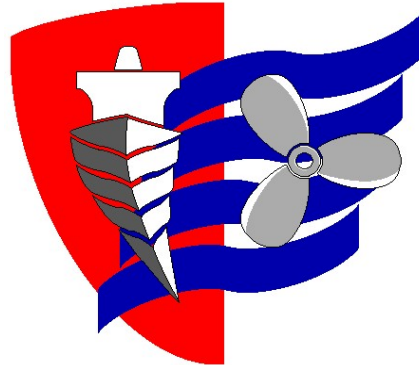


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*Trabajo Fin de Máster*

**CÁLCULO Y MEJORA DEL ÍNDICE DE  
EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL BUQUE  
BENCHIJIGUNA EXPRESS.**

---

**CALCULATION AND IMPROVEMENT OF THE  
ENERGY EFFICIENCY INDEX OF THE  
BENCHIJIGNA EXPRESS SHIP**

Para acceder al Título de Máster Universitario en

**INGENIERÍA MARINA**

Autor: José Antonio Franco Galán

Director: Sergio García Gómez

Julio - 2020



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

*Trabajo Fin de Máster*

**CÁLCULO Y MEJORA DEL ÍNDICE DE  
EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL BUQUE  
BENCHIJIGUNA EXPRESS.**

---

**CALCULATION AND IMPROVEMENT OF THE  
ENERGY EFFICIENCY INDEX OF THE  
BENCHIJIGNA EXPRESS SHIP**

Para acceder al Título de Máster Universitario en

**INGENIERÍA MARINA**

Julio - 2020



## AVISO DE RESPONSABILIDAD:

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Máster de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros,

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Máster, así como el profesor/a director no son responsables del contenido último de este Trabajo.



## **RESUMEN.**

**Palabras clave:** Eficiencia energética, EEDI, Fotovoltaica, PVGIS, EEOI, OMI

Este trabajo desarrolla un estudio técnico/económico sobre un buque de pasaje de alta velocidad. En él se aborda la problemática actual de la contaminación en el medio marino y las emisiones de CO<sub>2</sub> tanto a la atmósfera como al agua del mar.

Para evaluar las emisiones del barco se detallan sus características como el propio método de cálculo, desarrollando y explicando parte por parte todos los elementos de la fórmula y calculando el índice energético de diseño inicial. A continuación, se estima como solución técnica la incorporación de módulos solares al barco y se reevalúa el nuevo índice energético, teniendo en cuenta ambos valores y el estudio económico se considerará la viabilidad de la nueva instalación dando por concluido el estudio.

La última parte del trabajo se exponen las conclusiones sacadas de lo anterior y las referencias bibliográficas utilizadas





## **ABSTRAC**

**Keywords:** Energy efficiency, EEDI, Photovoltaic, PVGIS, EEOI

This work presents the development of a technical/economic research on a high-speed passenger ship. Current problems concerning pollution in the marine environment and CO<sub>2</sub> emissions to the atmosphere and the sea water are considered along this study.

To assess the emissions coming from the ship, its characteristics as well as the calculation method itself are detailed, developing and explaining bit by bit every element in the formula, and calculating the energy index in the initial layout. Then, it is estimated as technical solution the incorporation of solar modules onto the ship, as the reassessment of the new energy index. Taking into account both values and the economic study, the viability of the new installation will be considered to conclude with the study.



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>Índice de figuras. ....</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de tablas .....</b>	<b>xv</b>
<b>1. Introducción. ....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Naturaleza del trabajo .....	6
1.3 Contexto técnico.....	7
1.4 Justificación y objetivos.....	7
1.5 Relevancia.....	8
<b>2. Memoria descriptiva. ....</b>	<b>9</b>
2.1 Planteamiento del problema.....	9
2.1.1 Contaminación atmosférica en el transporte marítimo .....	10
2.1.2 Energía alternativa a los combustibles fósiles .....	13
2.1.2.1 Energía Eólica .....	13
2.1.2.2 Energía Solar .....	16
2.1.2.3 Pilas de hidrógeno.....	18
2.1.3 Sociedades de clasificación.....	21
2.1.4 prescripciones de eficiencia energética .....	23
2.1.4.1 Índice de Energética de Proyecto (EEDI).....	23
2.1.4.2 Índice de Energética Operacional (EEOI) .....	26
2.1.4.3 Plan de Gestión de Eficiencia Energética del Buque .....	28
2.2 Herramienta de resolución y metodología.....	29
2.2.1. Definición el buque del estudio.....	29
2.2.2 Descripción de la planta propulsora y generadora. ....	30
2.2.2.1 Planta propulsora. ....	30

2.2.2.2 Planta generadora.....	32
2.2.3 Descripción de los sistemas fotovoltaicos .....	34
2.2.3.1 Características de los paneles fotovoltaicos .....	35
2.2.3.2 Tipos de paneles fotovoltaicos .....	39
2.2.3.3 Inversores .....	40
2.2.3.4 Soporte para paneles solares. ....	43
2.2.3.5 Conexiones para paneles solares. ....	44
2.2.4 Cálculo del (EEDI). ....	47
2.2.5 Cálculo de la energía generada.....	51
2.2.6 Método de cálculo de estabilidad. ....	51
2.2.6.1 Estabilidad trasversal inicial .....	52
2.2.6.2 Determinación del brazo adrizante.....	53
<b>3. Aplicación práctica. ....</b>	<b>55</b>
3.1 Cálculo del iee inicial. ....	55
3.2 Cálculo de la instalación fotovoltaica.....	57
3.2.1 Ajuste la tensión de entrada: .....	64
3.2.2 Ajuste la intensidad de entrada: .....	65
3.3 Cálculo de la energía generada. ....	68
3.4 Cálculo del nuevo IEE. ....	72
3.5 Cálculo de estabilidad. ....	73
3.6. Estudio técnico comparativo .....	76
3.7 Estudio económico de la instalación .....	79
3.7.1 Amortización de la instalación. ....	79
<b>4. Conclusiones .....</b>	<b>83</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>85</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Ilustración 1: Zonas ECA actuales .....	11
Ilustración 2: Esquema tipo de una torre de lavado .....	12
Ilustración 3: MV Beluga SkySails .....	14
Ilustración 4: Simulación de la vela rígida desarrollada .....	15
Ilustración 5: E-Ship 1 de: ENERCON .....	16
Ilustración 6: Turanor Planet Solar.....	17
Ilustración 7: Velero con velas solares.....	18
Ilustración 8: Vista del Energy Observer.....	19
Ilustración 9: Vista del Ulstein SX190 .....	20
Ilustración 10: Sistema de propulsión diseñado pro ABB .....	21
Ilustración 11: Fórmula de EEDI en bloques.....	25
Ilustración 12: Detalle plano de construcción Benchijigua Express .....	29
Ilustración 13: Vista lateral MTU 20V8000 .....	30
Ilustración 14: Especificaciones de fabricante MTU 20V8000 .....	31
Ilustración 15: Esquema sistema de distribución principal .....	32
Ilustración 16: Vista lateral MTU 12V2000 .....	33
Ilustración 17: Especificaciones de fabricante MTU 12V2000 .....	34
Ilustración 18: Conexión tipo en paralelo. ....	45
Ilustración 19: Conexión tipo en serie. ....	45
Ilustración 20: Conexión tipo serie-paralelo. ....	46
Ilustración 21: Vista frontal con sección de módulos solares .....	52
Ilustración 22: Estado inicial de equilibrio .....	52
Ilustración 23: Estado final del periodo de escora.....	53
Ilustración 24: Plano de cubiertas.....	58
Ilustración 25: Plano de superficies libre para instalación.....	58
Ilustración 26: Esquema tipo de una instalación fotovoltaica de inyección. .	62
Ilustración 27: Ajuste de tensión para el inversor.....	64
Ilustración 28: Esquema de conexión de los módulos fotovoltaicos .....	65
Ilustración 29: Esquema de distribución con generación fotovoltaica.....	67

Ilustración 30: Navegación del Benchijigua Express.....	68
Ilustración 31: Datos solicitados por el PVGIS.....	69
Ilustración 32: Datos obtenidos del PVGIS .....	69

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores de Cf según combustible .....	47
Tabla 2: Coeficientes $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ y $\delta$ .....	49
Tabla 3: Características módulo SZ-160-36MFE .....	59
Tabla 4: Cálculos base panel SZ-160-36MFE. ....	60
Tabla 5: Característica módulo Jingo JKM320PP .....	60
Tabla 6: Cálculos base panel Jingo JKM320PP.....	61
Tabla 7: Comparativa Solamax SZ-160-35 MFE vs Jingo JKM320PP.....	61
Tabla 8: Datos módulo SP-JKM-320PP .....	62
Tabla 9: Datos inversor Sirio K100 .....	63
Tabla 10: Distribución pesos de la instalación fotovoltaica.....	73
Tabla 11: Presupuesto.....	80

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 1: Emisiones CO2 por tipo de barco.....	1
Gráfica 2: Consumo relativo entre los tipos de buque .....	2
Gráfica 3: Proyecciones de la demanda de transporte marítimo internacional	2
Gráfica 4: Proyección de las emisiones de CO2 según desarrollo .....	3
Gráfica 5: Generación eléctrica media en España.....	10
Gráfica 6: Producción de energía anual del sistema.....	70
Gráfica 7: Irradiación anual sobre el sistema.....	70
Gráfica 8: Balance energético anual. ....	71
Gráfica 9: Valores GZ y criterio de Rahola. ....	75
Gráfica 10: Comparativa de la energía producida por los motores auxiliares.	76
Gráfica 11: Comparativa del consumo de los motores auxiliares. ....	77
Gráfica 12: Comparativa de los índices EEDI. ....	78
Gráfica 13: Resumen de reducciones en valores porcentuales.....	78
Gráfica 14: Comparativa del coste de combustible en motores auxiliares...	79
Gráfica 15: Gráfica de amortización y gastos. ....	81





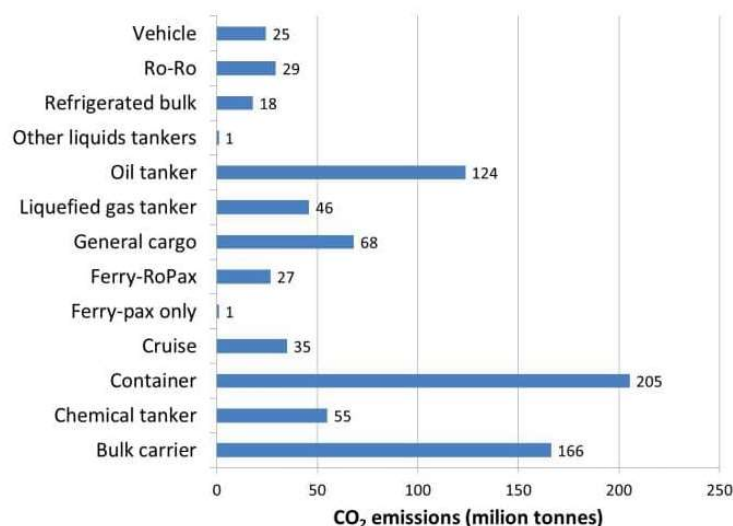
# 1. INTRODUCCIÓN.

## 1.1 ANTECEDENTES

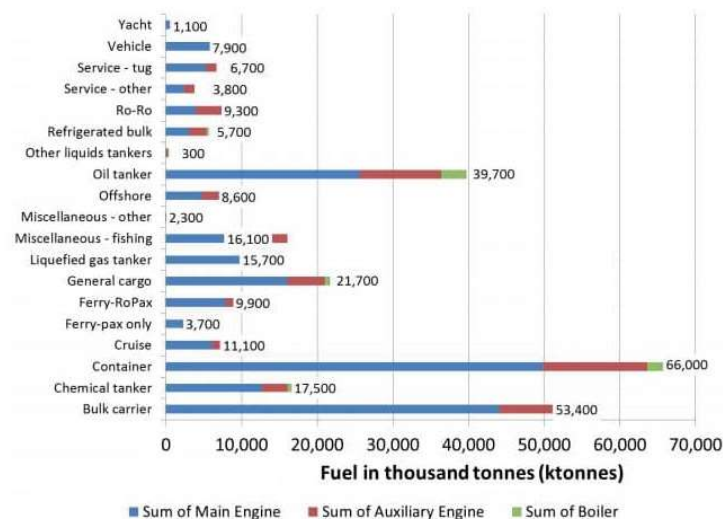
El presente trabajo se presentará en la Escuela Técnica Superior de Náutica, como Trabajo Fin de Master (TFM) con el objeto de obtener el título de Máster en Ingeniería Marina que da acceso al título profesional de Jefe de Máquinas de la Marina Mercante.

Actualmente la industria de la automoción está en pleno diseño de nuevas soluciones para la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub>, el mundo marítimo no está exento del cambio.

Según los datos de la Organización Marítima Internacional (OMI). El transporte marítimo supone unas emisiones de alrededor de 1.000 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año (Alrededor del 2,5% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero).

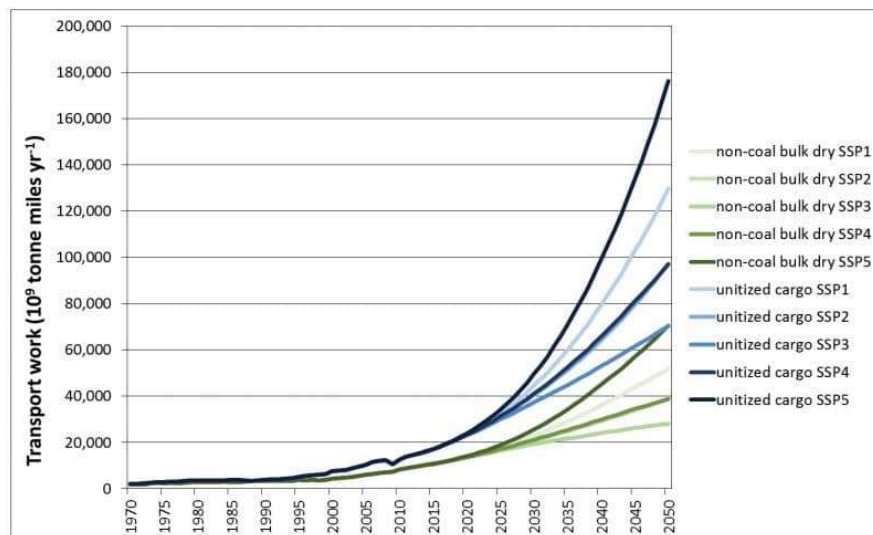


Gráfica 1: Emisiones CO<sub>2</sub> por tipo de barco, (Smit, 2019)

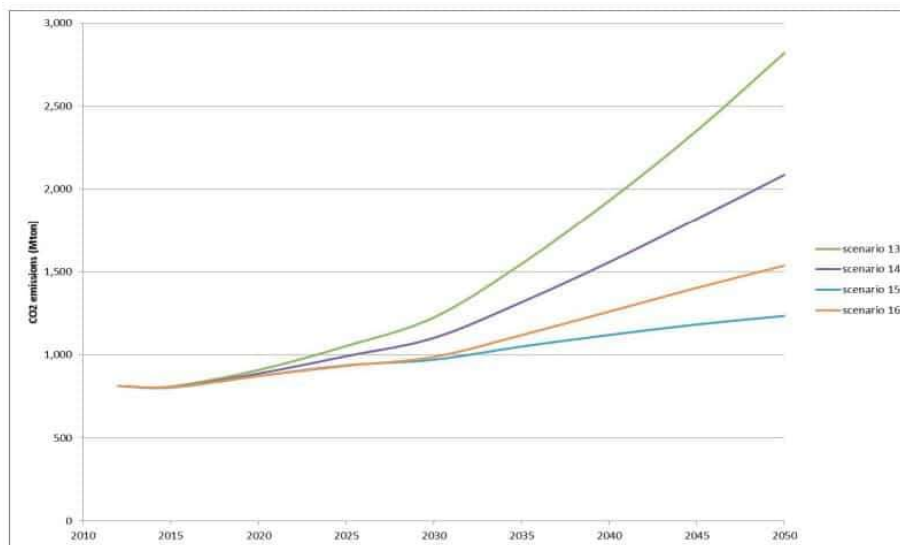


Gráfica 2: Consumo relativo entre los tipos de buque , (Smit, 2019)

Se predice que las emisiones aumentarán entre 50% – 250% para el año 2050, dependiendo de los desarrollos económicos y energéticos en el futuro. Según podemos verificar en las gráficas siguientes:



Gráfica 3: Proyecciones de la demanda de transporte marítimo internacional , (Smit, 2019)



Gráfica 4: Proyección de las emisiones de CO2 según desarrollo , (Smit, 2019)

Esto no es compatible con el objetivo acordado internacionalmente para mantener el aumento de la temperatura global por debajo de los 2°C en comparación con los niveles preindustriales, donde se requieren que las emisiones mundiales se reduzcan al menos a la mitad desde los niveles de 1990 para el 2050.

Según las estimaciones, el consumo de energía de los buques y en las emisiones de CO2 en el campo del transporte marítimo se podrían reducir hasta un 75% aplicando medidas operativas coherentes y tecnologías que ya existen. (Smit, 2019)

Para reducir esas emisiones la OMI ha lanzado el día 1 de enero de 2020 una normativa previene la contaminación ocasionada por los buques. La **IMO 2020** es la nueva regulación aprobada por la OIM que obliga a los barcos a emplear fueloil con un contenido máximo de azufre del 0.5% frente al actual 3.5% para reducir las emisiones de óxido de azufre, una sustancia que contribuye a la contaminación ambiental y a la destrucción de la capa de ozono. Para ello las navieras están barajando tres posibles soluciones para adaptarse a la normativa, cada una con sus ventajas e inconvenientes:

Un fueloil con un contenido máximo de azufre del 0.5%.

Métodos equivalentes autorizados, es decir emplear combustibles con mayor concentración de azufre combinados con sistemas de limpieza de los gases de escape, conocidos como “lavadores” que “limpian” los gases antes de emitirlos a la atmósfera.

Otros tipos de fuel de bajo o cero contenido en azufre como el gas natural licuado (GNL), o los biofueles.

A simple vista, la primera podría parecer la medida más económica y sencilla de aplicar ya que no implica una modificación de las infraestructuras de los buques, pero la disponibilidad de fueloil de contenido en azufre inferior al 0.5% no es tan alta como la de otros combustibles por lo que la oferta y la demanda podrían encarecerlo. (TIBA España, 2019)

Es por este motivo que cada vez hay más empresas desarrollando soluciones alternativas a los combustibles fósiles, una de esas alternativas es la de propulsión por rotores, que data de 1924 y permite reducir el consumo. Sin embargo, de momento lo usan unos pocos barcos.

En 2017, China lanzó el primer carguero 100% eléctrico, es capaz de recorrer 50 millas con dos horas de carga, las cuales las realiza estando atracado. Si bien el barco es otra señal de los cambios que vienen a nuestra relación con los combustibles fósiles, su carga muestra que todavía estamos lejos de un cambio completo. Irónicamente, el primer buque de carga completamente eléctrico del mundo se está utilizando para mover carbón. (Futurism, 2017).

Aparte de la propulsión solar, existen otras tecnologías como las velas solares, las pilas de combustible o los aerogeneradores, pero la verdad que en el futuro no será “mono tecnología” si no híbridos, de hecho, ya hoy día se ha conseguido dar la vuelta al mundo durante 6 años con cero emisiones en un catamarán híbrido, es alimentado por energía solar, eólica e hidrógeno. Todas estas fuentes eléctricas se conectan a las baterías y esa energía almacenada se usa para producir hidrógeno, extrayéndolo a través de la

electrólisis del agua de mar que el barco recoge a medida que se mueve. Este hidrógeno a su vez alimenta las celdas de combustible para impulsar el motor eléctrico. Sin emisiones, no hay partículas finas, solo propulsión silenciosa.

Aparte de las tecnologías descritas, actualmente también se trabajan en combustibles “verdes”, combustibles más eficientes y menos contaminantes. Por ejemplo, hace unos meses el grupo A.P. Moller-Maersk ha hecho un comunicado mediante una nota de prensa que informa que han pasado de usar un biocombustible con aceites de cocina usados como alternativa con menos emisiones en sus grandes cargueros, a plantearse el futuro con otras alternativas, entendiendo dicho futuro descarbonizado con alcohol (etanol y metanol), biometano y amoníaco en sus buques.

Desde la multinacional naviera explican que *“estas tres rutas de combustibles tienen proyecciones de costos relativamente similares pero diferentes desafíos y oportunidades”*.

Tras dicho proyecto piloto con aceites usados, destacaron que *“los biocombustibles de segunda generación sostenibles son solo una posible solución para la descarbonización del transporte marítimo. Se necesitan avances a más largo plazo en combustible y desarrollo técnico (incluida la electricidad) y la inversión en cadenas de suministro comerciales para lograr reducciones significativas de emisiones”*.

De hecho, siguen dejando una puerta abierta a otras alternativas, por lo que es posible que vuelvan los aceites usados. Empleando el ochenta por ciento del enfoque hacia emisiones netas cero en esta tres hipótesis de trabajo.

En el apartado de los alcoholes citan expresamente al etanol y el metanol, *“con varias posibles vías de producción directamente a partir de biomasa y/o mediante hidrógeno renovable combinado con carbono de biomasa o captura de carbono”*. *“El etanol y el metanol se pueden mezclar completamente en los tanques de combustible del buque, facilitando los repostajes”*, aseguran.

Asumen que a transición de la industria hacia soluciones basadas en alcohol aún no se ha definido, todo lo contrario, con el biometano. En este caso afirman que *“se trataría de una transición suave dada la tecnología e infraestructura existentes”*.

Por último, el amoniaco, menos desarrollado como combustible y más como una forma de almacenar y transportar hidrógeno en pilas de combustible, lo consideran igualmente *“libre de carbono y puede ser producido a partir de electricidad renovable”*. Afirman que *“la tasa de conversión de energía de este sistema es más alta que la de los sistemas basados en biomateriales, pero la vía de producción no puede aprovechar las fuentes de energía potenciales, como por ejemplo residuos de biomasa”*.

En este caso, el principal desafío radica en que *“el amoníaco es altamente tóxico e incluso pequeños accidentes pueden crear riesgos importantes para la tripulación de las embarcaciones y el medio ambiente”*. (Rico, 2019)

## **1.2 NATURALEZA DEL TRABAJO**

El presente trabajo desarrolla un estudio técnico/económico de un buque “Fast Ferry” (F/F) de aluminio de 8.973 GT, capacidad para 1.291 pasajeros y una planta propulsora de 36.400kW siendo capaz de alcanzar una velocidad de 38 nudos.

El trabajo desarrolla un estudio basado en el cálculo del índice de eficiencia energética inicial basado la guía “Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design for new ships” potenciado por Marine Environment Protección Committee (MEPC) (Marine Environment Protección Committee, 2018).

Esto permite tener un dato de partida sobre las emisiones CO<sub>2</sub> del buque a estudio y nos ofrece un punto de partida en la mejora de la instalación.

### **1.3 CONTEXTO TÉCNICO.**

Las salas de máquinas (SM) de los buques son un conjunto de instalaciones de cierta complejidad. Dentro de ellas y en un contexto de aprovechamiento energético cabría destacar tres sistemas:

- Evaporadores: Ellos producen agua destilada a partir de agua salada obtenida del mar y calor de los motores principales mediante el agua de refrigeración de alta.
- Economizadores: Producción de vapor mediante el aprovechamiento del calor residual de los gases de escape.
- Generadores de cola (GC): Generación de electricidad aprovechando el movimiento del eje de propulsión.

Estos sistemas siendo operados y mantenidos correctamente permiten al buque mejorar su eficiencia y reducir sus emisiones de gases contaminantes.

En el caso de los buques Fast Ferrys, estos no disponen de ningún sistema de los anteriormente nombrado y debido a sus altos consumos de combustible derivado de sus altas velocidades emiten mayor cantidad de gases contaminantes, debido a esto se ha intentado mejorar la eficacia del buque estudiado con la colocación de módulos solares, aprovechando las superficies útiles del barco (Ilustración 25) y de las casi 4.800 horas de sol al año que se dispone en la zona de navegación (PROMOTUR, 2016).

### **1.4 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.**

Actualmente el interés por la eficiencia energética viene impulsado por un tema más económico que medioambiental y en el tema marítimo no está exento, los armadores buscan equipos e instalaciones más eficientes que les haga mejorar su cuenta de resultados.

En julio de 2011 el MEPC publica el primer instrumento sobre el cambio climático jurídicamente vinculante para el mundo marino. Se desarrolla la

resolución MEPC.203(62) actualmente derogada por MEPC.308(73) incluido en el anexo VI del MARPOL, el cual adopta los coeficientes “*energy efficiency design index*” (EEDI) y el Energy “*efficiency operational indicator*” (EEOI) los cuales permiten situar nuestro buque dentro de la normativa de regulación de emisiones de CO<sub>2</sub>.

A partir de esto y con los datos obtenidos del sistema de control de la SM se fija el primer objetivo, calcular un EEDI inicial, este nos mostrara que cantidad de CO<sub>2</sub> emitimos a la atmósfera.

El segundo objetivo es planificar y diseñar una instalación fotovoltaica que aproveche las zonas “no hábiles” de las cubiertas, se elige este tipo de instalación debido a que es menos voluminosa y es más modular, una propiedad significativa debido a que las formas de los buques no son regulares.

El tercer y último objetivo sería el volver a calcular el EEDI, pero restado la potencia producida por la nueva instalación, estudiar la mejora de emisiones y la viabilidad de la inversión.

## **1.5 RELEVANCIA.**

La relevancia de este trabajo radica en que cada vez más existen nuevas tecnologías, materiales y técnicas que consiguen diseñar y fabricar buques más eficientes y más rentables, ya no sólo por el ahorro del armador, si no bajo mi punto de vista para la mejora del medio ambiente. No sólo esta tecnología es aplicable a los grandes buques mercantes, también a pequeña escala es aplicable a veleros o barcos de recreo.



## **2. MEMORIA DESCRIPTIVA.**

### **2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

Según Greenpeace “El cambio climático es el mal de nuestro tiempo y sus consecuencias pueden ser devastadoras si no reducimos drásticamente la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero. De hecho, los impactos del cambio climático ya son perceptibles y quedan puestos en evidencia por datos como:

El aumento de la temperatura global.

La subida del nivel del mar.

El progresivo deshielo de las masas glaciares, como el Ártico

Pero hoy también estamos viendo los impactos económicos y sociales, que serán cada vez más graves, como:

Daños en las cosechas y en la producción alimentaria.

Las sequías.

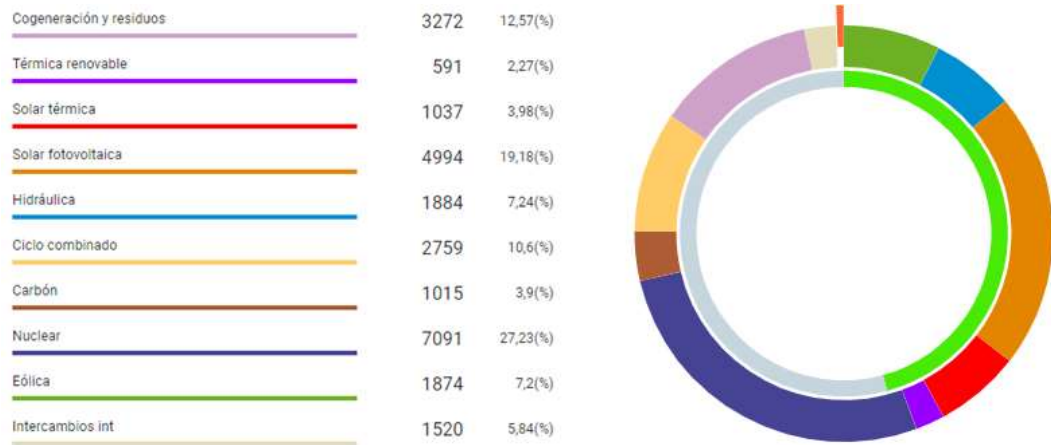
Los riesgos en la salud.

Los fenómenos meteorológicos extremos.

Megaincendios.

Todavía en 2016, el 85% de la energía usada en España provenía de combustibles fósiles o energía nuclear”. (Greenpeace, 2020)

A día de hoy en el 2020 y según Red Eléctrica de España la producción de energía no renovable ha bajado, en la gráfica 5 se observa que dicha disminución ronda el 55% aproximadamente (Red Eléctrica de España, 2020), una bajada significativa en cuatro años, lo que hace pensar que, aunque lento se va por el buen camino.



Gráfica 5: Generación eléctrica media en España , (Red Eléctrica de España, 2020)

## 2.1.1 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN EL TRANSPORTE MARÍTIMO

Los reglamentos de la OMI para hacer frente a los contaminantes atmosféricos procedentes del transporte marítimo internacional, especialmente las emisiones de óxido de azufre (SOx) y óxido de nitrógeno (NOx), han conseguido disminuir la cantidad de estos contaminantes emitidos por los buques. El fortalecimiento de dichas prescripciones persistirá en el futuro.

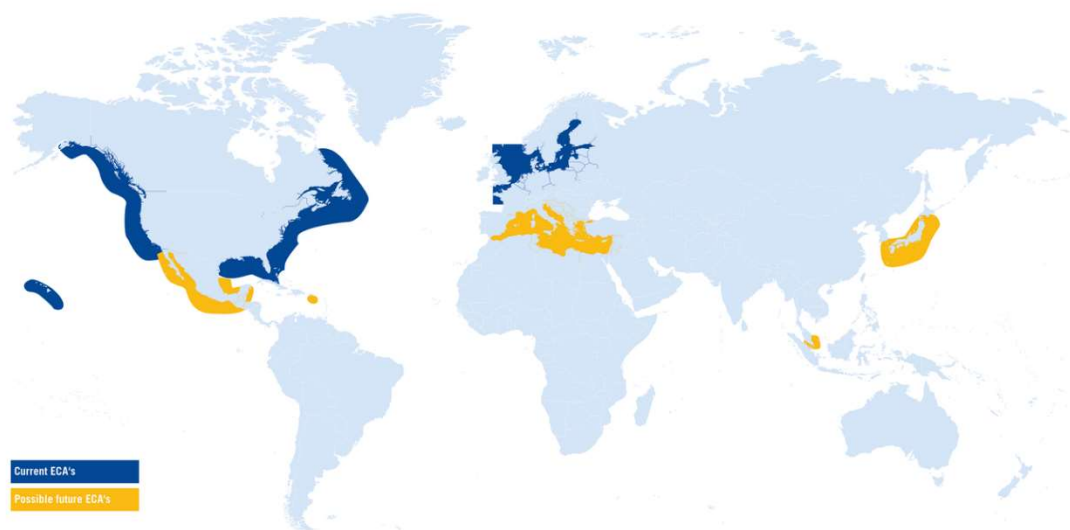
Existen límites mundiales, con prescripciones más severas en las zonas de control de emisiones (ECAs), en la actualidad, existen cuatro zonas ECAs designadas por la OMI (ilustración 1):

Zona del mar Báltico (sólo SOx).

Zona del mar del Norte (sólo SOx).

Zona de Norteamérica (SOx, NOx y Partículas en suspensión (PM)).

Zona del mar Caribe de los Estados Unidos (SOx, NOx y PM).



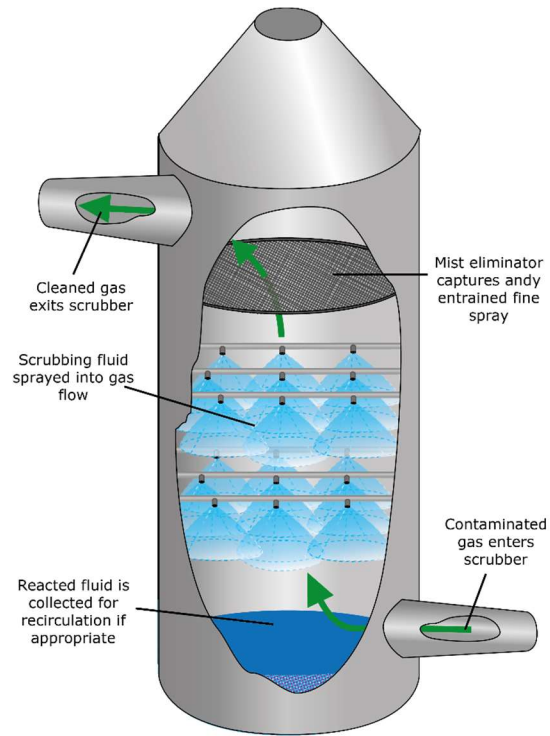
*Ilustración 1: Zonas ECA actuales , (RHENUS Logistics, 2019)*

En las zonas de control de las emisiones de SOx (SECAS), el límite de contenido de azufre es de 0.10%.

Fuera de las SECAS, el límite de contenido de azufre es de 3.50 % y desciende a 0.50% desde el 1 de enero de 2020.

El uso de scrubbers para limpiar los gases de escape de los motores marinos que utilizan hidrocarburos residuales con alto contenido en azufre y combustible diésel es una opción más económica para reducir las emisiones de SOx de aire como requiere el Anexo VI del MARPOL para la prevención de la contaminación por los buques. (OMI, 2020)

Los sistemas de limpieza de gases de escapes (EGCS) (ilustración 2) utilizados en la actualidad para el control del azufre son conocidos comúnmente como scrubbers de SOx. En un scrubber húmedo, el gas de escape se mezcla con el agua de lavado y los componentes solubles en agua de los gases de escape



*Ilustración 2: Esquema tipo de una torre de lavado , (Soutullo, 2018)*

se eliminan por disolución en el agua de lavado. Los scrubbers de SOx son capaces de eliminar hasta el 95 % de SOx de los buques (EGCSA, 2010).

Al eliminar el azufre de los gases de escape, el scrubber también elimina la mayor parte de las partículas en suspensión directas de sulfato. Los sulfatos son una gran parte de las partículas que provienen de los buques que operan con combustibles altos en azufre. Mediante la reducción de las emisiones de SOx, el scrubber también controla la mayor parte de las partículas secundarias que se forman en la atmósfera a partir de esas emisiones.

El agua de lavado generada por un EGCS puede contener contaminantes de tres fuentes:

Los contaminantes recogidos de los gases de escape procedentes de motores (productos de combustión, combustibles y lubricantes)

La fuente de agua de lavado utilizada para limpiar los gases de escape (agua de mar o agua dulce)

El propio scrubber (disolución de materiales, posibles productos de reacción o aditivos químicos)

El uso de scrubbers de SOx para el tratamiento de las emisiones de los motores diésel en buques en navegación oceánica hasta ahora se limita a unos pocos buques.

## **2.1.2 ENERGÍA ALTERNATIVA A LOS COMBUSTIBLES FÓSILES**

La sensación que el sector de las renovables es de aplicación principal sobre la edificación o sobre el transporte terrestre es generalizada, pero otros sectores menos conocidos como el transporte marítimo podrían tener un alto impacto positivo sobre el medio ambiente si de forma generalizada cambiarán el tipo de combustible tradicional que utilizan. Uno de los puntos clave para el cambio en el sector está en los sistemas de propulsión de los buques. Según las estimaciones, el consumo de energía de los buques y en las emisiones de CO<sub>2</sub> en el campo del transporte marítimo se podrían reducir hasta un 75% aplicando medidas operativas coherentes y tecnologías que ya existen.

A continuación se desarrolla ejemplos de barcos y buques que están favoreciendo el uso de energías alternativas y menos contaminantes. (Smit, 2019)

### **2.1.2.1 ENERGÍA EÓLICA**

Entre los diferentes tipos de propulsión eólica que se pueden encontrar cabe destacar:

**Velas.**

**Rotores Flettner.** Son grandes cilindros verticales capaces de producir un empuje hacia adelante cuando la presión del aire es lateral, esto es debido

a que la presión del aire hace girar al cilindro llamado rotor al mismo tiempo que hace avanzar la nave de modo perpendicular al aire en movimiento. (Wikipedia, 2019)

**Cometas.** Basado de esta tecnología se pueden encontrar algunos ejemplos de propulsión eólica como:

El MV **Beluga SkySails**; un buque de 132 metros de eslora, es el primer buque mercante del mundo que uso una enorme cometa de alta tecnología para ayudar a sus motores, a fin de reducir el consumo de combustible y las emisiones. En el viaje de 11.952 millas náuticas entre Europa y América el consumo de combustible se redujo en un 20%, lo que significó hasta 1.300€ diarios de ahorro en petróleo y menos emisiones de CO<sub>2</sub>. (Sánchez, 2008)



*Ilustración 3: MV Beluga SkySails , (Máquinas de Barco, 2017)*

**Sistema bound4blue;** un sistema de velas rígidas, plegables y autónomas, para ser integradas en una amplia gama de buques. Es un sistema de propulsión complementario que proporciona grandes empujes gracias al viento, lo que permite reducir la potencia del motor y, por consiguiente, un ahorro de combustible y de las emisiones contaminantes asociadas de hasta un 40%. (bound4blue, 2020)



*Ilustración 4: Simulación de la vela rígida desarrollada , (bound4blue, 2020)*

**E-Ship 1;** Perteneciente a la empresa alemana Enercon, dispone de un sistema de impulsión eólica para naves mediante el uso de cuatro rotores Flettner instalados en la cubierta. Este sistema, inventado por el alemán Anton Flettner en la década de los 20, permite reducir el consumo de combustibles fósiles hasta un 30%, disminuyendo las emisiones de CO<sub>2</sub> y contribuyendo a la sostenibilidad del medio ambiente. El buque utiliza un sistema híbrido con 7 generadores diésel eléctricos y cuatro rotores Flettner de 25 metros de altura por 4 metros de diámetro que aprovechan la fuerza del viento para impulsar el buque. (Oliveira, 2014)



*Ilustración 5: E-Ship 1 de: ENERCON , (Oliveira, 2014)*

### **2.1.2.2 ENERGÍA SOLAR**

Puede parecer un número bajo, pero desde que se empezó a usar de forma más recurrente la energía solar como fuente de energía en un barco, el número de barcos solares ha llegado a los mil. Algunas de estas naves han llegado a cruzar los océanos Atlántico y Pacífico, sin ninguna clase de combustible. (Terol, 2019)

Existen varias formas en las que podemos aprovechar este tipo de energía en nuestra embarcación:

Para alimentar el motor de la embarcación. En este caso tendremos que asegurarnos de tener un panel solar lo suficientemente grande como para absorber la cantidad de energía que el motor necesite.



Para alimentar dispositivos y accesorios que requieran de energía eléctrica para su funcionamiento.

#### Iluminación de la embarcación

Uno de los buques más importante en este sector es el **Turanor**, El barco más grande del mundo totalmente alimentado por energía solar, está cubierto de 516 metros cuadrados de paneles solares que alimentan sus dos motores eléctricos, tiene unas dimensiones de 31 metros de largo, 15 metros de ancho, el barco mantiene una velocidad media de crucero de 5,3 nudos (aunque es capaz de ir hasta 14 nudos). La extensión de los paneles solares hace que el catamarán se parece más a un avión que a un barco, las 'alas' se puede direccionar por lo que los paneles pueden estar inclinados hacia el sol a todas horas del día, no importa en qué dirección se mueva el barco. (Nautical News Today, 2013)



*Ilustración 6: Turanor Planet Solar , (Nautical News Today, 2013)*

La empresa australiana **SolarSailor** ha creado desde pequeños catamaranes turísticos a yates privados, o incluso, grandes buques comerciales. La característica que hace únicos a estos "SolarSails" son sus paneles a modo de vela, que aprovechan la energía del sol y la del viento. En algún otro modelo, también utilizan una tecnología híbrida con motores eléctricos y de combustión convencionales.



*Ilustración 7: Velero con velas solares , (Gajitz, 2015)*

### **2.1.2.3 PILAS DE HIDRÓGENO**

Embarcaciones que utilizan hidrógeno para desplazarse como combustible cero emisiones. Este es el futuro sobre el que trabaja la industria naviera, con varios proyectos pioneros en marcha. Se trata de un escenario aún lejano, pero prometedor. Entre los proyectos más importantes hoy día tenemos:

El **Energy Observer**, botado en 2017, la primera embarcación de hidrógeno recorrerá el mundo durante cinco años, la embarcación utiliza la combinación de diferentes fuentes de energía renovables (eólica, solar e hidráulica) además de un sistema que produce hidrógeno a partir de agua de mar sin generar carbono. Su funcionamiento consta de un electrolizador que descompone  $H_2O$  en oxígeno e hidrógeno para comprimir y almacenar el hidrógeno en depósitos que suministran 22 kW a una pila de combustible. Siendo capaz de generar electricidad a través de una pila de combustible alimentada con hidrógeno extraído del agua de mar y mediante dos motores que funcionan como hidrogenadores, movidos por las olas. (TOYOTA, 2020)



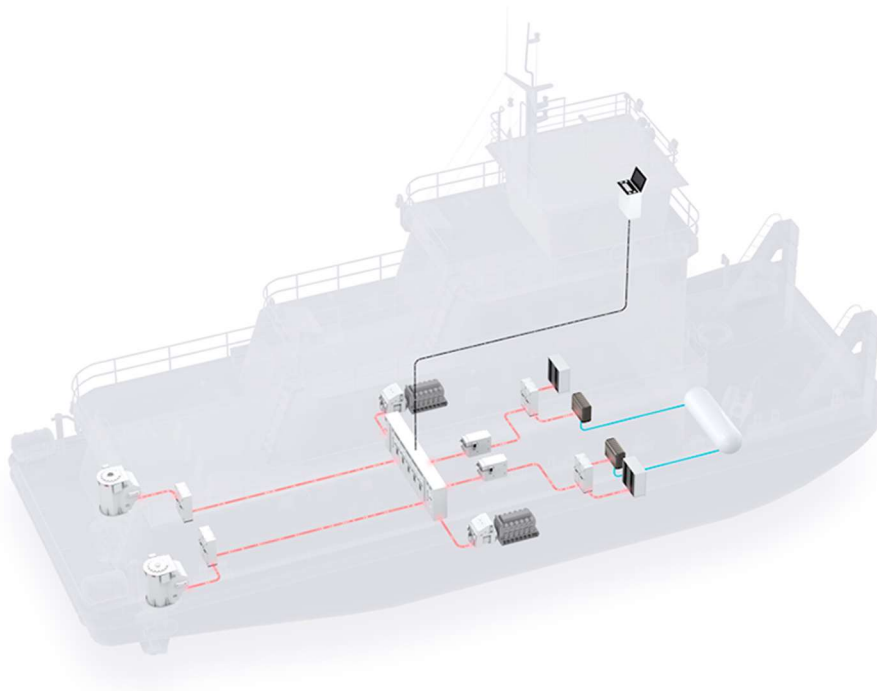
*Ilustración 8: Vista del Energy Observer , (TOYOTA, 2020)*

Otro proyecto interesante es el **Ulstein SX190**, un buque eléctrico dotado de un sistema con pila de combustible de hidrógeno dedicado a la construcción y reparaciones. Se trata de un modelo de 99 metros de eslora impulsado por un sistema de motores eléctricos capaces de ofrecer una potencia en cada uno de sus dos impulsores de 1.280 kW, y en sus dos propulsores de 750 kW, y que le propulsan hasta una velocidad máxima de 11 nudos, también cuenta con una potencia total instalada de 7,5 MW, de los cuales 2 MW son generados por un sistema de pila de combustible. (ULSTEIN, 2019)



*Ilustración 9: Vista del Ulstein SX190 , (ULSTEIN, 2019)*

La empresa ABB tampoco se queda atrás en esta carrera, esta será la encargada de dar propulsión y energía al primer buque fluvial del mundo que funcionará exclusivamente con pila de combustible de hidrógeno. Este sistema dispone de pilas de 400kW que permiten las operaciones del buque. (Híbridos y eléctricos, 2019)



*Ilustración 10: Sistema de propulsión diseñado pro ABB , (Híbridos y eléctricos, 2019)*

### **2.1.3 SOCIEDADES DE CLASIFICACIÓN.**

En el negocio marítimo y sector de la construcción naval, las sociedades de clasificación son organizaciones que agrupan un número importante de profesionales, como inspectores de buques y de equipos marinos, ingenieros navales, etc.. con el objetivo de promover tanto la seguridad de la vida humana en el mar, como la de los la buques, así como también la protección del medio ambiente marino, asegurando elevados criterios técnicos para el proyecto, fabricación, construcción y mantenimiento de los buques mercantes y no mercantes. (Mar & Gerencia, 2010)

La materialización de estos objetivos se logra mediante la ejecución de las siguientes tareas:

Desarrollo de reglas de clasificación, las cuales constituyen la confirmación de que el diseño de los buques cumple con dichas reglas.

Inspección de los buques durante el periodo de construcción.

Inspecciones periódicas para confirmar que los buques continúan cumpliendo dichas reglas.

En el ámbito de las instalaciones fotovoltaicas en buque no se describe ninguna normativa o regla de una sociedad de clasificación que se le aplique a este tipo de instalación, salvo una norma específica de la International Electrotechnical Commission (IEC) sobre la corrosión por niebla salina en los módulos fotovoltaicos.

La **IEC 61701:2011** IEC 61701: 2011 describe secuencias de prueba útiles para determinar la resistencia de diferentes módulos fotovoltaicos a la corrosión de la niebla salina que contiene Cl<sup>-</sup> (NaCl, MgCl<sub>2</sub>, etc.). Todas las pruebas incluidas en las secuencias, excepto la prueba de funcionalidad del diodo de derivación, se describen completamente en IEC 61215, IEC 61646, IEC 62108, IEC 61730-2 e IEC 60068-2-52. Esta norma se puede aplicar tanto a los módulos fotovoltaicos de placa plana como a los módulos y conjuntos fotovoltaicos concentradores. La prueba de niebla salina se basa en IEC 60068-2-52 en lugar de IEC 60068-2-11 como en la edición 1, ya que el estándar anterior se usa mucho más ampliamente en el campo de componentes electrónicos. Según este cambio, la nueva edición 2 incluye una secuencia de prueba de ciclismo que combina en cada ciclo una exposición a niebla salina seguida de almacenamiento de humedad en condiciones controladas de temperatura y humedad relativa. Esta secuencia de prueba es más adecuada para reflejar los procesos de corrosión que ocurren en los módulos FV sometidos a atmósferas corrosivas permanentes o temporales. (IEC, 2011)

## **2.1.4 PRESCRIPCIONES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA**

La OMI ha establecido una serie de líneas de base relativas a la cantidad de combustible que los buques, según el tipo, pueden consumir para una determinada capacidad de carga. Los buques que se construyan en el futuro tendrán que cumplir y mejorar esas líneas de base por una cantidad determinada, que será cada vez más severa. Para 2025, todos los nuevos buques serán un 30% más eficientes desde el punto de vista energético que aquellos construidos en 2014.

En virtud de los reglamentos de eficiencia energética, los buques existentes en la actualidad deben habilitar un plan de gestión de esa eficiencia energética, atendiendo a elementos como la planificación de la travesía, la mayor frecuencia de la limpieza de las partes sumergidas del buque y la hélice, la introducción de medidas técnicas como los sistemas de recuperación de calor residual, o incluso la instalación de nuevas hélices.

Las prescripciones de eficiencia energética fueron adoptadas como enmiendas al Anexo VI del Convenio MARPOL en 2011, y entraron en vigor el 1 de enero de 2013. Los reglamentos convirtieron al Índice de eficiencia energética de proyecto (EEDI) en obligatorio para nuevos buques, mientras que el Plan de gestión de la eficiencia energética del buque (SEEMP) es requerido para todos los buques junto con el al Índice de eficiencia energética operacional (EEOI).

### **2.1.4.1 ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DE PROYECTO (EEDI)**

El EEDI para los buques nuevos es la medida técnica más importante y tiene como finalidad promover el uso de equipos y maquinaria de mayor eficiencia energética (menos contaminantes). El EEDI requiere un nivel de eficiencia energética mínimo por milla de capacidad (por ejemplo, tonelada-milla) para distintos tipos y segmentos de tamaño de buque. Desde el 1 de enero de 2013, tras una fase cero inicial, de dos años de duración, todo

proyecto de buque nuevo debe cumplir el nivel de referencia para el tipo de buque de que se trate. El nivel de referencia se ajustará gradualmente cada cinco años, por lo que se espera que el EEDI propicie de forma constante la innovación y el desarrollo técnicos de todos los componentes que inciden en la eficiencia del buque en función del consumo de combustible, desde la fase de proyecto.

El EEDI ofrece una cifra concreta para un determinado proyecto de buque, expresada en gramos de dióxido de carbono por milla de capacidad del buque (cuanto menor sea el EEDI mayor será la eficiencia energética de los parámetros del proyecto técnico del buque de que se trate).

El EEDI es un mecanismo de carácter no prescriptivo, basado en criterios de rendimiento que deja en manos del sector la elección de las tecnologías que habrán de utilizarse en el proyecto de un buque concreto. En tanto se alcance el nivel reglamentario de eficiencia energética, los proyectistas y constructores de buques son libres de elegir las soluciones más eficientes para que los buques cumplan las normas. Dichas normas fueron actualizadas el 26 de octubre de 2018 (MEPC.308(73)). El anexo V describe la metodología a seguir para obtener el cálculo del EEDI. (OMI, 2019)

#### **2.1.4.1.1 CÁLCULO DEL EEDI (ANEXO V)**

El EEDI obtenido o requerido, será el valor real de EEDI para un barco y representará la cantidad de CO<sub>2</sub> generada por un buque mientras realiza una tonelada-milla de trabajo de transporte. Se resume como un método de cálculos que tiene en cuenta la diversidad de tipos de buques, tamaños de buques, tecnologías de propulsión alternativas, combustibles alternativos y futuras tecnologías renovables. Como se presenta en la siguiente figura.



<b>Main Engine</b>	<b>Aux Engine (s)</b>	<b>Innovative Energy Eff. Power Gen.</b>	<b>Innovative Energy Eff.</b>
--------------------	-----------------------	--	-------------------------------

$$EEDI = \frac{\left( \prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{FAE}) + \left( \left( \prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPG} P_{PG(i)} - \sum_{i=1}^{nRE} f_{RE(i)} \cdot P_{RE(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{FAE} \right) - \left( \sum_{i=1}^{nIE} f_{IE(i)} \cdot P_{IE(i)} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{FAE} \right)}{t_0 \cdot f_0 \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w}$$

Ilustración 11: Fórmula de EEDI en bloques , (Marine Education, 2016)

Este método de cálculo, se ve influenciado por distintos factores tecnológicos que afectan de forma significativa el nivel del EEDI. Se pueden destacar 4 factores fundamentales que hay que tener en cuenta a la hora de calcular el EEDI.

El primer factor a tener en cuenta, es el que se encuentra representado por el primer término en el numerador de la fórmula, es el motor principal y la energía que son necesarios para la propulsión del buque.

El segundo factor, representado por el segundo término en el numerador, es el de los requisitos de potencia auxiliar del buque.

El tercer término y tercer factor del numerador representa a cualquier dispositivo de generación de energía (eléctrico) innovador a bordo, así como a la electricidad de recuperación de calor residual o energía solar.

El cuarto y último término del nominador hace referencia a las tecnologías innovadoras que proporcionan energía mecánica para la propulsión de buques, como la energía eólica (velas, cometas, etc.)

### 2.1.4.1.2 VERIFICACIÓN PREVIA Y FINAL DEL EEDI

La verificación del EEDI se lleva a cabo por la administración, utilizando los datos y documentos correspondientes y observando el modelo del buque y las pruebas marítimas de puesta en march. En consecuencia, la verificación de EEDI se lleva a cabo en dos etapas: verificación previa y verificación final. La verificación previa se realiza en la etapa de diseño del buque, mientras que

la verificación final se lleva a cabo después de la construcción y como parte de las pruebas marítimas de puesta en marcha del buque. Los datos de diseño del buque pertinentes, los datos de prueba del tanque y los datos de prueba de velocidad estarán sujetos a escrutinio y verificación por las sociedades de clasificación. Las directrices de la OMI sobre verificación EEDI están desarrolladas para garantizar la coherencia de la verificación, aunque algunos aspectos importantes como los métodos de escalado de potencia de velocidad y el enfoque unificado para la corrección de los datos medidos aún deben armonizarse como parte de las prácticas industriales.

Para la verificación preliminar en la etapa de diseño, se presenta un archivo técnico de EEDI, el cual debe contener la información necesaria. El archivo técnico de EEDI debe ser desarrollado por el diseñador del barco en esta etapa. El contenido del archivo técnico de EEDI debe incluir todos los datos requeridos para los cálculos de EEDI, el verificador puede solicitar información adicional como una descripción de la instalación de prueba de tanques (incluidos los equipos de prueba y las calibraciones), las líneas del modelo y el barco real para la verificación de la similitud del modelo y el barco real, la presentación de los datos de estabilidad del buque, el proceso de cálculo de la velocidad de referencia del barco, una copia del archivo técnico de NOx y un resumen documentado de la corrección SFC para cada tipo de motor, u otros datos específicos para buques específicos.

En la verificación final, las rutas marítimas y la verificación de la curva velocidad-potencia del barco son un elemento esencial. Además, como parte de la verificación final, se volverá a visitar y verificar todos los aspectos relevantes del cálculo de EEDI.

#### **2.1.4.2 ÍNDICE DE ENERGÉTICA OPERACIONAL (EEOI)**

EEOI es un elemento del marco regulatorio de la OMI que actúa como indicador de rendimiento de la eficiencia energética durante la fase operativa del buque y es utilizado para supervisión del rendimiento general de eficiencia

energética del buque. Su objetivo principal, es establecer un enfoque coherente para medir la eficiencia energética de un barco para cada viaje, o durante un período de tiempo determinado. Se pretende que el EEOI contribuya a los armadores y operadores de buques en la evaluación del rendimiento operacional de su flota y que permita la supervisión de buques individuales en estado de operación y, por tanto, de resultados de cualquier cambio realizado en el buque o su operación. De esta manera se recomienda que el EEOI se utilice como herramienta de monitoreo en el SEEMP, tal como se explica en el anexo VI del MARPOL.

El EEOI representa la emisión de CO<sub>2</sub> real de la combustión de todo tipo de combustibles a bordo de un buque durante cada viaje. Este se calcula multiplicando el consumo total de combustible para cada tipo de combustible con el factor de carbono respectivo de cada combustible. Por otra parte, el trabajo de transporte realizado se calcula multiplicando la masa real de carga por la distancia real correspondiente en millas náuticas recorridas por el buque. (OMI, 2011)

#### **2.1.4.2.1 OBJETIVOS DEL EEOI**

Dado que la cantidad de CO<sub>2</sub> emitida por un buque está directamente relacionada con su consumo real de combustible, el cálculo del EEOI proporciona información relevante sobre el rendimiento de un buque con respecto a su eficiencia operacional. La OMI proporciona unas directrices para ayudar a los usuarios en el proceso de establecer un mecanismo para lograr la limitación o reducción de las emisiones de GHG de los buques en operación. Las directrices del EEOI están destinadas a proporcionar un ejemplo de un método de cálculo que podría utilizarse como objetivo, basado en el rendimiento para controlar la eficiencia de la operación de un buque. Las directrices EEOI son de carácter recomendatorio y presentan un posible uso de un indicador operativo. Sin embargo, al igual que el SEEMP, los armadores, operadores de buques y las partes interesadas pueden

implementar las directrices de la OMI o un método equivalente en sus sistemas de gestión ambiental y considerar la adopción de los principios allí contenidos al desarrollar planes para la supervisión del rendimiento. (OMI, 2011)

### **2.1.4.3 PLAN DE GESTIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL BUQUE**

El SEEMP debe desarrollarse teniendo en cuenta las directrices pertinentes de la OMI. Los barcos existentes recibirán un certificado IEE, cuando se verifique la existencia de SEEMP a bordo. De acuerdo con las directrices de la OMI, el SEEMP establece un mecanismo para que las compañías navieras mejoren la eficiencia de las operaciones de sus buques. El SEEMP además proporciona un enfoque para supervisar el rendimiento de eficiencia de un barco a lo largo del tiempo. El SEEMP solicita al propietario y al operador del buque a que, en cada etapa de la operación del buque, revisen y consideren las prácticas operativas y la actualización tecnológica para optimizar el rendimiento de la eficiencia energética del buque.

El propósito de un SEEMP es el establecer un mecanismo para mejorar la eficiencia energética del buque durante su operación. El SEEMP debe ser específico para cada uno de los buques, ya que no hay dos compañías navieras o armadores que sean iguales, y los buques operan bajo una amplia gama de condiciones diferentes, incluidas geográficas y comerciales.

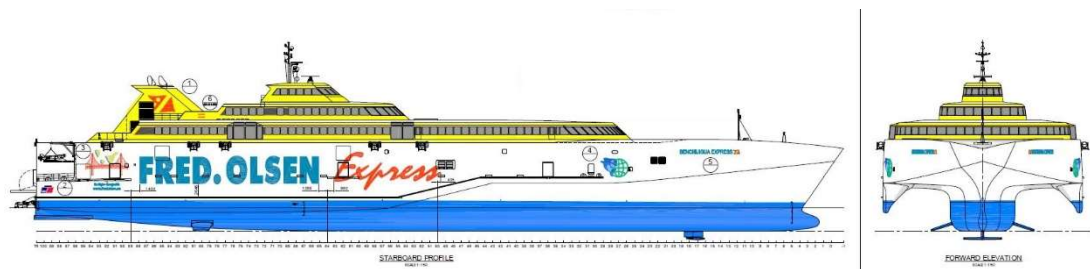
Normalmente las empresas tienen un sistema de gestión ambiental (EMS) establecido según ISO 140016, el cual contiene procedimientos para seleccionar las mejores medidas para embarcaciones particulares y luego establecer objetivos para la medición de parámetros relevantes, junto con características de control y retroalimentación relevantes. Muchas empresas también desarrollan, implementan y mantienen un Sistema de Gestión de Seguridad. En tales casos, el SEEMP puede formar parte del sistema de gestión de seguridad del buque.

## 2.2 HERRAMIENTA DE RESOLUCIÓN Y METODOLOGÍA.

Para obtener el resultado que define este trabajo de fin de máster, debemos seguir los siguientes pasos.

### 2.2.1. DEFINICIÓN EL BUQUE DEL ESTUDIO.

El presente trabajo desarrolla un estudio técnico/económico del buque “FF Benchijigua Express” perteneciente a la compañía Fred Olsen.



*Ilustración 12: Detalle plano de construcción Benchijigua Express , (Fred Olsen Express, S.A., 2005)*

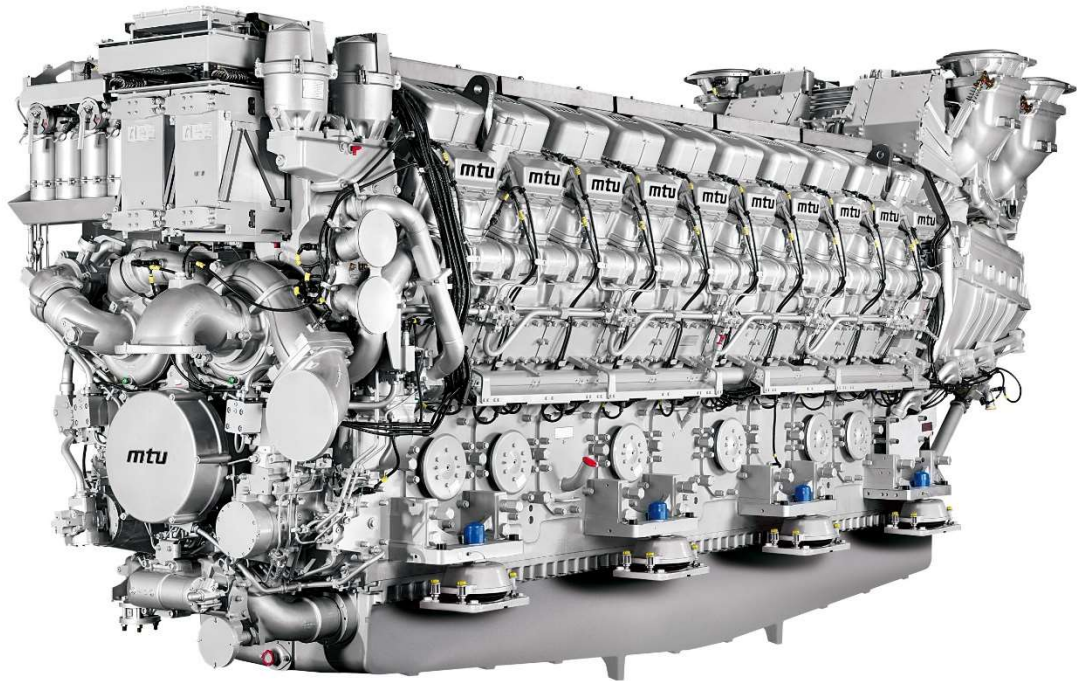
El Benchijigua Express (ilustración 12) ostenta hoy día con su hermano militar (USS Independence), el rango de trimarán más grande del mundo, el contrato de la construcción número 260 del astillero Austal Ships, factoría naval con sede en Fremantle (Australia), se firmó en junio de 2003. El 25 de septiembre de 2005 se puso a flote.

De 8.973 toneladas brutas, 2.427 toneladas netas y 1.076 toneladas de peso muerto, mide 126,65 metros de eslora total (116,85 m de eslora entre perpendiculares), 30,40 m de manga, 8,20 m de puntal y 3,98 m de calado máximo. Transporta un total de 1.291 pasajeros, su capacidad de carga es de 341 coches o 123 coches y 450 metros lineales de carga rodada. (Lorenzo J. C., 2015)

Actualmente Fred Olsen está construyendo en los mismos astilleros dos barcos de este tipo que presumiblemente entraran en funcionamiento entre el 2020 y 2021.

## **2.2.2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA PROPULSORA Y GENERADORA.**

### **2.2.2.1 PLANTA PROPULSORA.**

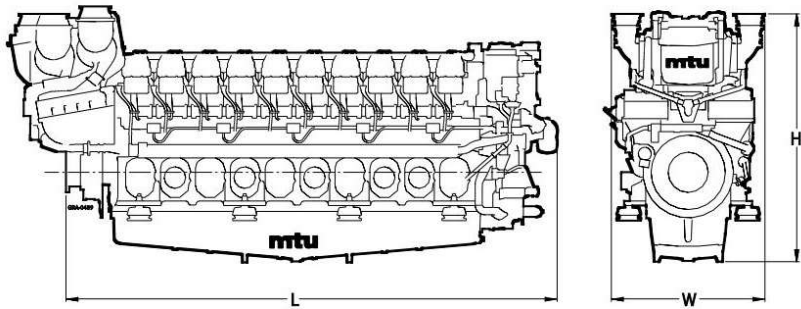


*Ilustración 13: Vista lateral MTU 20V8000 , (MTU Solutions, 2020)*

La ilustración 13 muestra el MTU 20V8000 uno de los cuatro motores que componen la planta propulsora, una planta propulsora alojada en el casco central y capaz de desarrollar una potencia de 36.400kW que se transmiten a tres “wáter jets”, uno central denominando “booster” y dos direccionales. A continuación, se muestra las principales características de construcción.

Dimensions and Masses

20V 8000	Dimensions (LxWxH) mm (in)	Mass, dry kg (lbs)	Mass, wet kg (lbs)
M71R/M71/M71L	6645x2040x3375 (261.6x80.3x132.9)	45300 (98870)	47665 (105080)

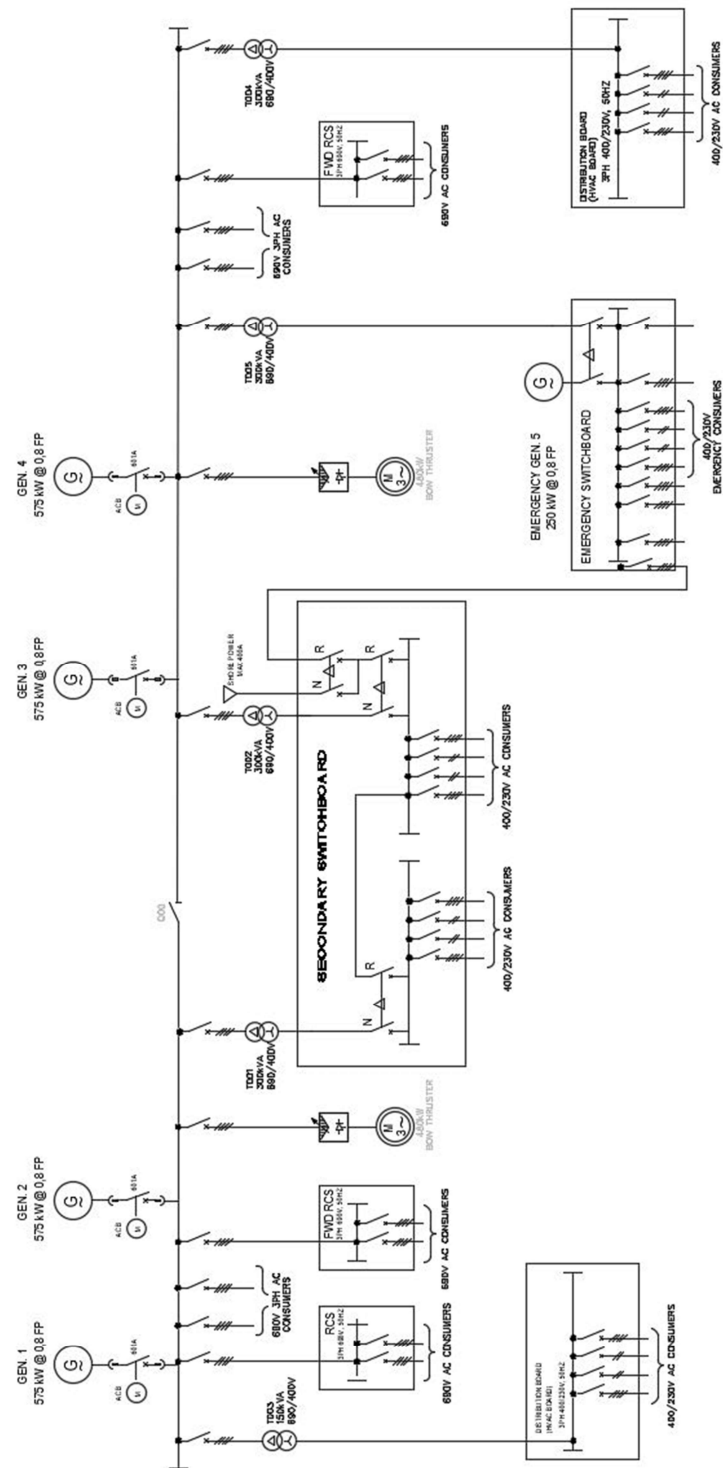


Engine Model		20V 8000 M71R	20V 8000 M71	20V 8000 M71L
Rated power ICFN	kW (bhp)	7200 (9655)	8200 (10995)	9100 (12205)
Speed	rpm	1150	1150	1150
No. of cylinders		20	20	20
Bore/stroke	mm (in)	265/315 (10.4/12.4)	265/315 (10.4/12.4)	265/315 (10.4/12.4)
Displacement, total	l (cu in)	347.4 (21200)	347.4 (21200)	347.4 (21200)
Optimization of exhaust emissions <sup>1)</sup>		IMO II	IMO II/EPA 2	IMO II/EPA 2

<sup>1)</sup> IMO – International Maritime Organisation (MARPOL)  
EPA – US Marine Directive 40 CFR 94

Ilustración 14: Especificaciones de fabricante MTU 20V8000 , (MTU Solutions, 2020)

#### 2.2.2.2 PLANTA GENERADORA.



*Ilustración 15: Esquema sistema de distribución principal , (Fred Olsen Express, S.A., 2005)*



El sistema de distribución principal (ilustración 15) está compuesta por cuatro motores auxiliares *MTU 12V2000* (ilustración 16) acoplados a alternadores *STAMFORD HCM63451* alojados en el casco central, capaces de entregar a la red 810kVA con un voltaje de salida de 690V.

Este tipo de buques no dispone de generadores de cola debido a que esto iría en decremento de la velocidad, por lo tanto, toda la energía eléctrica necesaria es generada por motores auxiliares, sus principales características se muestran en la ilustración 17.

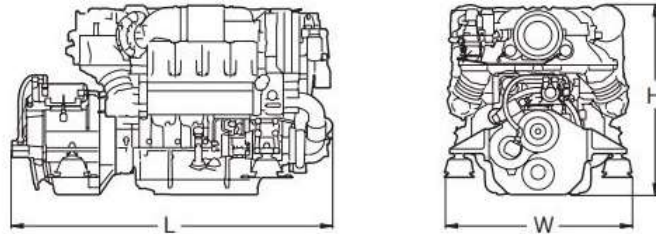
En este apartado es donde se trabajará para mejorar la eficiencia del buque, se diseñará una planta fotovoltaica en las cubiertas para poder disminuir la carga de los auxiliares y así reducir las emisiones del CO<sub>2</sub>.



*Ilustración 16: Vista lateral MTU 12V2000 , (MTU Solutions, 2020)*

### Dimensions and Masses

2000 M70 - with gearbox	Dimensions (LxWxH) mm (in)	Mass, dry kg (lbs)
12V/ZF 2050	2600x1890x1290 (102.4x74.4x50.8)	3480 (7672)



Typical applications: Ferries, Monohulls, Hydrofoils, Catamarans, Surface Effect Ships and Displacement Yachts

Engine Model		12V 2000 M70
Rated power ICFN	kW (bhp)	788 (1055)
Speed	rpm	2100
No. of cylinders		12
Bore/stroke	mm (in)	130/150 (5.1/5.9)
Displacement, total	l (cu in)	23.9 (1458)
Flywheel housing		SAE 1
Gearbox type		ZF 2050
		i = 1.2 - 2.5
Optimization of exhaust emissions <sup>1)</sup>		IMO I

1) IMO - International Maritime Organization (MARPOL)  
EPA - US marine directive 40 CFR 94

Ilustración 17: Especificaciones de fabricante MTU 12V2000 , (MTU Solutions, 2020)

## 2.2.3 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Las instalaciones fotovoltaicas (FV) ya son habituales en el sector industrial y poco a poco vemos el incremento en el sector naval, la razón fundamental es porque permiten menores costes de operación, y por tanto mayor competitividad, pero un diseño erróneo puede reducir la expectativa de

éxito. Para ello se describirán sus componentes y características principales que harán la instalación más efectiva.

### **2.2.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS**

Estas serían las principales características que se deberían tener en cuenta a la hora de estudiar una instalación:

**Monocrystalino o policristalino.** La diferencia básica está en el procedimiento de fabricación. Las células de silicio monocrystalino se obtienen a partir una sola estructura cristalina, mientras que en las células policristalinas la pasta de silicio se deja solidificar lentamente sobre un molde, con lo cual se obtiene un sólido formado por pequeños cristales de silicio. El rendimiento teórico de los monocrystalinos es ligeramente mayor, y también su precio.

**Tensión de trabajo y número de células.** Para instalaciones solares aisladas con baterías, los paneles son de 36 células (12 V) o 72 células (24V). Si el módulo lo queremos utilizar en una pequeña instalación aislada que alimenta a una batería (monoblock por ejemplo) necesitaremos paneles de 12V, mientras que si nuestra instalación es un poco más grande y tiene un sistema de acumulación mayor (dos baterías monoblock o 12 vasos estacionarios) necesitaremos paneles de 24V.

**Potencia de salida.** Es la potencia teórica de salida del módulo solar, el término que usamos habitualmente para referirnos al tamaño o capacidad del panel; ahora bien es una potencia que casi nunca conseguimos en condiciones de operación normal porque este valor ha sido medido en condiciones de medición estándar (STC por su siglas en inglés): 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiación, a 25°C de temperatura de célula ( tendríamos una temperatura de célula así cuando la temperatura ambiente fuese aproximadamente - 7,5°C) y una distribución espectral de 1,5 AM, condiciones que muy raramente se reproducen en nuestro día a día.

**Tolerancia.** - Debido al proceso de fabricación y a los diferentes componentes que forman un panel solar, la potencia de salida puede variar sensiblemente respecto a la indicada en la hoja de características técnicas. A esta variación la denominamos tolerancia y puede venir indicada en W o en %. Imaginemos que tenemos un panel de 100W con una tolerancia +/- 5%. Significa que el panel puede entregarnos una potencia comprendida entre 95W y 105W. Si el panel nos ha costado 100€, en el primer caso nos sale a 1.05€/Wp y en el segundo 0.95€/Wp.

**Eficiencia.** - Se denomina eficiencia de un panel solar fotovoltaico a la potencia que es capaz de producir 1 metro cuadrado de panel solar fotovoltaico cuando recibe una irradiación de 1000 W/m<sup>2</sup>. Si en la hoja de características técnicas de un panel solar fotovoltaico de 245W vemos que tiene una eficiencia del 15%, significa que por cada 1000W/m<sup>2</sup> de irradiación que recibe 1 metro cuadrado de panel, éste producirá 150 W de potencia. En la actualidad es bastante común exaltar la calidad de los paneles solares de mayor eficiencia, y muchas veces, los paneles solares de mayor eficiencia son bastante más caros. Si tenemos una cubierta muy “justa”, deberemos instalar paneles solares de mayor eficiencia para optimizar al máximo la instalación.

**Características eléctricas a temperatura de operación nominal:** La potencia de los paneles viene dada en condiciones estándar de medida, pero estas condiciones normalmente no se dan cuando el panel solar está en funcionamiento. Por ello, tiene mayor relevancia el valor de potencia en condiciones nominales (ya que estas condiciones suelen ser más habituales): 20°C de temperatura ambiente, 800 W/m<sup>2</sup> de irradiación, velocidad del aire de 1 m/s y una distribución espectral de AM 1,5. Un valor habitual de potencia para un panel de 245W en condiciones de operación es de 180 W. Un buen panel solar debería reflejar estos datos en su hoja de características.

**Características Térmicas:** Hay dos parámetros importantes:

**Temperatura de operación nominal de la célula (NOCT):** es la temperatura que alcanzan las células del módulo en condiciones de operación normales, principalmente a 20°C de temperatura ambiente e irradiancia de 800W/m<sup>2</sup>. Conviene saber que la NOCT tiene una relación directa con la temperatura que alcanzan las células a una temperatura ambiente determinada, y que cuanto menor es la temperatura del módulo mejor trabajará y más potencia entregará. Por lo tanto, cuanto menor sea la NOCT mejor.

**Coefficiente de temperatura de Potencia:** indica la pérdida porcentual de potencia de salida del panel por cada grado por encima de los 25°C que aumenta la temperatura de las células del módulo. Cuanto menor, mucho mejor. (Monsolar.com, 2018)

Como ya se comentó al inicio del punto, todos estos factores son necesarios estudiarlos a la hora de diseñar una instalación, pero a veces, depende el tamaño de esta, el factor económico releva a segundo plano las características anteriores, sino no se hace una buena elección de módulos, nuestra instalación puede ser de baja calidad e ineficiente, apareciendo a medio plazo problemas con los módulos fotovoltaicos. Estos problemas pueden ser:

**Puntos calientes, o 'hotspots',** debido a una mala calidad de las células solares empleadas en el montaje del producto. La consecuencia es, a medio plazo, un panel solar inservible y la obligación de comprar uno nuevo.

**Destrucción del Tedlar:** Debido a la baja calidad de muchos fabricantes, se suele producir degradación y destrucción del Tedlar (la parte posterior del panel solar), debido a un punto caliente. También provocará que el panel acabe siendo inservible.

**Deslaminado de las células fotovoltaicas integradas en el panel.** Eso se debe a una fabricación defectuosa a la hora de hacer el laminado y acabará provocando que el panel sea inservible.

Es un caso que sucede mucho con fabricantes asiáticos de calidad media-baja, debido a que el proceso de laminado requiere tiempo de espera y, en muchos casos, esos fabricantes lo acortan para incrementar la fabricación a costa de que ocurran estos problemas posteriormente.

**Problemas con los diodos de bypass.** Siempre que sea posible, preguntar por el tipo de diodos de bypass que usa la caja de conexiones del panel. Lo ideal son diodos de bypass militares, que soportan mucho mejor las altas temperaturas y condiciones extremas. También es importante que estén bien encapsulados (que los tape la silicona protectora). Hay muchos casos de diodos de baja calidad que lo que provocan es que, más tarde o más temprano, se quemen y el panel deje de funcionar.

**Amarilleamiento del EVA.** Otro caso muy habitual en paneles baratos de origen asiático. El EVA utilizado en esos casos es de muy baja calidad y con el paso del tiempo se degrada y provoca una gran pérdida de producción.

**Soldaduras defectuosas.** En ocasiones ocurre que el proceso de soldadura no está optimizado, también que las temperaturas de soldadura son incorrectas. Lo que puede provocar es la aparición de un punto caliente, con el consecuente fallo del panel y ser inservible para la obtención de energía del mismo.

**Cambios de empresa fabricante para evitar cubrir garantías.** Una práctica muy habitual, generalmente en fabricantes asiáticos, fabricar bajo una marca, pero cambiar cada poco tiempo la empresa que fabrica esos paneles. La razón es evitar cubrir garantías cuando exista reclamación. Si la empresa que fabricaba, ya no existe, .... la garantía ya no existe.

**Fabricantes de pegatinas.** Son empresas que crean una marca, que se venden como producto europeo, pero que ni son fabricantes ni su producto es europeo. Simplemente compran panel barato a un tercero, le ponen una pegatina con su marca y “a correr”.

**La degradación inducida por potencial (PID).** Es un efecto que muchos desconocen, incluidos instaladores, promotores etc., pero que, sin

embargo, tiene unas consecuencias demoledoras en el rendimiento de un panel.

EL PID es una degradación en paneles fotovoltaicos causante de pérdida de rendimiento que se debe a la presencia de corrientes parásitas en los mismos. Su efecto potencial puede reducir la potencia del equipo hasta en un 30%. La causa de estas corrientes se debe a la presencia de diferencias de potencial entre el módulo y tierra. En la mayoría de sistemas fotovoltaicos sin puesta a tierra, los módulos tienen un voltaje no nulo que genera este efecto, si bien es más frecuente en voltajes negativos, especialmente cuando se dan condiciones de altos voltajes, alta humedad ambiental o elevadas temperaturas. (Germán Cordero, 2019)

### 2.2.3.2 TIPOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS

Por el tipo de construcción los paneles pueden dividirse en:

**Paneles solares flexibles:** Son paneles fotovoltaicos instalados en una tela especial, que hace posible que las células de silicio capten la radiación solar y, sin necesidad de una compleja estructura rígida, generen energía eléctrica de inmediato.

De gran eficiencia para poder aprovechar al máximo el espacio dedicado al panel solar flexible, las aplicaciones más frecuentes para este tipo de paneles son caravanas, embarcaciones etc....

**Paneles solares semi flexibles:** La construcción robusta de este tipo de paneles lo hacen perfecto para instalaciones marinas, lo que permite una flexibilidad de hasta 3% normalmente.

**Paneles solares de marco fijo:** Los paneles solares de marco fijo tienden a ser rígidos y están contruidos con materiales como el vidrio templado y el aluminio para que sean lo suficientemente duraderos como para resistir la exclusión de los elementos en una instalación permanente.

**Paneles solares plegables:** Estos paneles tienden a ser flexibles, duraderos y están contruidos con materiales basados en la tecnología CIGS (material semiconductor compuesto de Cobre, Indio, Galio y Selenio) que les permite plegarse en un tamaño pequeño. Por norma general, este tipo de paneles flexibles se utilizan para alimentar pequeños dispositivos electrónicos y teléfonos

### **2.2.3.3 INVERSORES**

Los inversores juegan un papel fundamental en los sistemas solares fotovoltaicos, convirtiendo la potencia de corriente continua generada por los paneles solares, a corriente alterna utilizable por aparatos eléctricos convencionales. Aunque todos los inversores cumplen la misma función básica, se pueden clasificar en tres tipos según su forma de operar:

#### **Inversores de cadena.**

Los inversores de cadena reciben su nombre porque se conectan a un circuito de paneles solares en serie (una cadena). Por lo tanto, la corriente a través de todos los paneles es la misma, y sus voltajes se suman directamente. Algunos inversores de cadena permiten la conexión de varios circuitos paralelos, en lugar de utilizar un mismo circuito para toda la matriz fotovoltaica.

#### **Ventajas de los Inversores de Cadena**

Los inversores de cadena tienen el menor costo.

El mantenimiento resulta sencillo, ya que la potencia se acondiciona y se convierte a corriente alterna en un solo punto (el inversor). Los módulos individuales simplemente utilizan una caja de conexión para unirse al circuito en serie.

Como toda la potencia de la matriz solar se recolecta como corriente directa, la integración con sistemas de baterías resulta más sencilla.



## **Desventajas de los Inversores de Cadena**

La conexión de módulos solares en serie es sencilla, pero trae un inconveniente: Si un módulo solar tiene fallas o es cubierto por una sombra, toda la cadena se ve afectada. Por esta razón, los inversores de cadena se adaptan mejor a sitios donde no hay sombras, y la matriz tiene orientación y radiación solar uniforme. También es muy importante mantener la matriz solar limpia.

Si hay una falla en el inversor, no se puede utilizar la energía generada. Una fuente de potencia en corriente continua no se puede sincronizar con la red eléctrica.

## **Microinversores**

Esta tecnología funciona en forma opuesta a los inversores de cadena:

En lugar de un inversor central, hay un inversor compacto para cada panel solar.

En lugar de conexión serie en corriente continua, se utiliza conexión paralela en corriente alterna.

## **Ventajas de los Microinversores**

Gracias a la conexión paralela, cada panel solar opera en forma independiente al resto del sistema. Por lo tanto, los problemas de un módulo no afectan al resto. Al usar microinversores, una matriz fotovoltaica puede operar efectivamente incluso si hay diferencias de orientación entre los módulos, o sombras ocasionales.

Los microinversores se pueden integrar con un sistema de monitoreo, permitiendo la detección remota de problemas. De esta forma, no se pierde tiempo buscando el fallo.

La puesta a tierra es sencilla, ya que se puede integrar directamente al circuito de microinversores.

Mayor producción de energía que un sistema con inversores de cadena, de la misma capacidad instalada en kW.

### **Desventajas de los Microinversores**

Los microinversores son más caros a la hora de la instalación

Su integración con sistemas de baterías es compleja, al requerir dos pasos adicionales de conversión de energía. Debido a que la potencia se convierte a corriente alterna inmediatamente a la salida de cada módulo, se debe reconvertir a CD para almacenaje en baterías, y luego convertir otra vez a CA para su uso.

El mantenimiento resulta complejo, ya que hay un microinversor en cada panel solar. Si el acceso a la matriz solar es complicada, quizás los microinversores no son la mejor opción

### **Inversores centrales con optimizadores de potencia**

Esta tecnología puede considerarse una híbrida de las dos mencionadas anteriormente. El sistema utiliza un inversor central, pero los módulos no están conectados directamente al circuito serie - cada módulo se conecta por medio de un optimizador de potencia, y a la vez los optimizadores se conectan en serie.

### **Ventajas de los Optimizadores de Potencia**

El acondicionamiento de voltaje permite independencia entre los módulos, similar al caso de los microinversores - un módulo con problemas no afecta al resto.

Los optimizadores pueden equiparse con un sistema de monitoreo para identificar y resolver problemas con facilidad.

La optimización de voltaje crea condiciones estables de operación, permitiendo la conexión de circuitos más largos que los de un inversor de cadena convencional.

Hay una salida de potencia en corriente continua antes del inversor, lo que simplifica el uso de baterías o dispositivos de corriente directa.

Para un mismo valor de capacidad instalada en kW, un sistema con optimizadores de potencia genera más energía que uno convencional solamente con inversor de cadena.

### **Desventajas de los Optimizadores de Potencia**

Mayor costo que un sistema convencional con inversor de cadena.

Mayor complejidad de mantenimiento, ya que cada panel solar tiene un optimizador. (Imaz, 2018)

## **2.2.3.4 SOPORTE PARA PANELES SOLARES.**

Las estructuras solares son imprescindibles para dotar a los paneles solares de la inclinación y orientación que necesitan a la hora de aprovechar al máximo el potencial de la instalación solar. Ahora bien, los diferentes tipos de superficies (planas o inclinadas), junto a otros factores importantes (tipo de terreno y condiciones climáticas), originan la necesidad de contar con distintas estructuras para adaptarse a cada una de ellas.

### **Estructuras para cubiertas inclinadas**

Las estructuras para cubiertas inclinadas son las más económicas y sus múltiples ventajas las convierten en una opción ciertamente recomendable. A la hora de optar por un tipo de estructura u otro lo más conveniente es analizar el lugar donde está prevista su instalación.

### **Estructuras para superficies planas**

Las superficies planas permiten la instalación de estructuras regulables, que permiten colocar los paneles solares en función del grado de inclinación requerido. Lo hacen a través de unos ángulos regulables tremendamente efectivos, y pueden utilizarse tanto en cubiertas planas como

en instalaciones en el suelo. De ese modo, la estructura se adaptará al grado de inclinación más adecuado, independientemente del lugar de instalación y de la temporada en la que será utilizada.

Cuando el uso del sistema está previsto para todo el año, los paneles deberán colocarse con una inclinación mayor para aprovechar los rayos solares durante los meses de diciembre y enero, meses en los que la altura del sol se encuentra muy baja. Sin embargo, si el uso tiene cabida en verano, el grado de inclinación será mucho menor, pues el sol en esa época del año se encuentra a mayor altura.

### **Estructuras de módulos fotovoltaicos para suelo**

Este sistema se adapta perfectamente a las instalaciones en campo abierto, tal y como sucede con el sistema de bombeo solar, donde es preciso adaptarse al tamaño de la placa y al ángulo de la estructura.

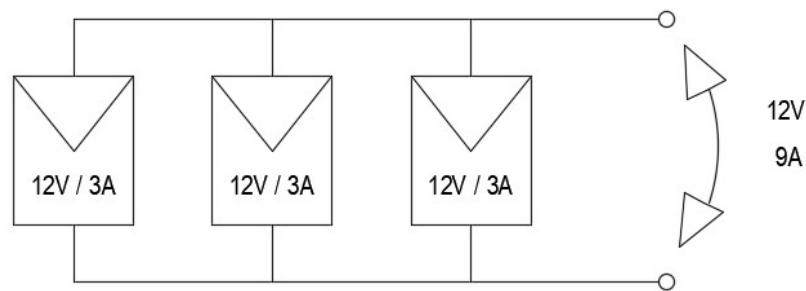
Dependiendo del tipo de superficie en el que se instalarán las estructuras de los paneles solares, no siempre será posible la perforación. Para ello existen soportes especialmente desarrollados para aquellas cubiertas planas donde no se puede taladrar la cubierta. (alusín solar, 2019)

## **2.2.3.5 CONEXIONES PARA PANELES SOLARES.**

La conexión de los paneles solares puede ser: en serie, en paralelo o bien una combinación de serie y paralelo.

### **Conexión de los paneles solares en paralelo:**

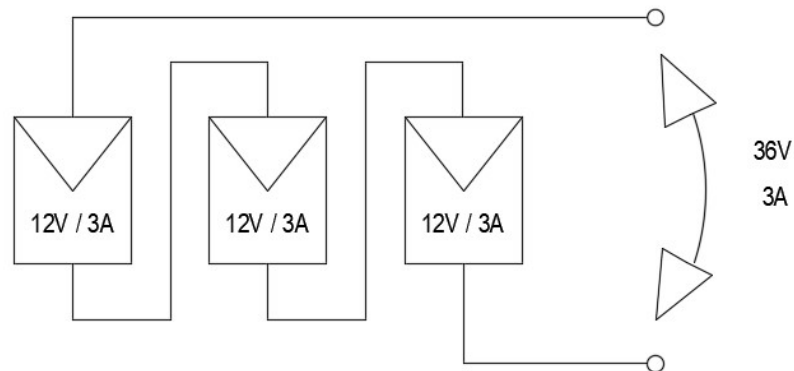
Para realizar la conexión de los paneles solares en paralelo debemos conectar todos los positivos juntos, y todos los negativos juntos. Con esta conexión conseguimos que la tensión sea la que nos proporciona el panel solar y la intensidad que conseguimos al realizar esta conexión será la suma de todas las intensidades que nos proporciona cada panel.



*Ilustración 18: Conexión tipo en paralelo.*

### **Conexión de los paneles solares en serie:**

Para realizar la conexión de los paneles solares en serie debemos conectar el positivo de un panel solar al negativo del otro, realizando esta acción sucesivamente hasta tener en un extremo el positivo y en el otro el negativo. En la conexión en serie de los paneles solares conseguimos como resultado una tensión que será la suma todas las tensiones



*Ilustración 19: Conexión tipo en serie.*

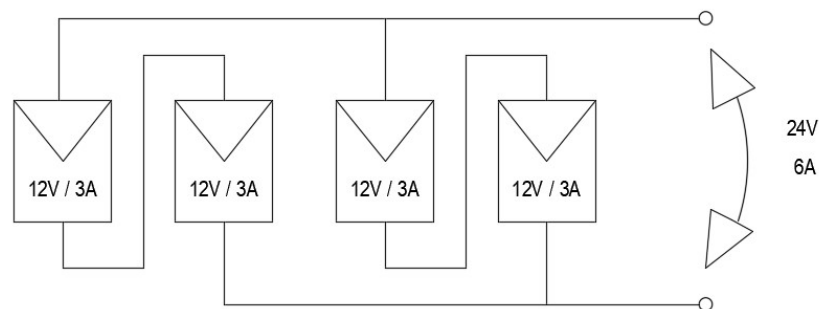
El uso de este tipo de conexiones es muy frecuente en los sistemas que incorporan regulador de carga MPPT ya que esto nos permite tener tensiones en nuestro campo fotovoltaico más elevadas (100V o 150V de tensión máxima en circuito abierto) que en baterías. Por lo que si usamos un regulador de carga MPPT nos permite conectar paneles a una mayor tensión que en baterías, la cantidad de paneles solares que podemos conectar va a

depender del regulador seleccionado. Este tipo de reguladores permiten sacar más de un 20% más de producción a los paneles.

La utilización de los reguladores de carga PWM, está limitada para los paneles de 36 células o 72 células, para realizar conexiones de 12V, 24V o 48V. Los reguladores PWM no se pueden conectar a paneles de 60 células.

### **Conexión de paneles solares en serie-paralelo:**

Muchas veces necesitamos aumentar tanto la tensión como la intensidad. Para ello debemos realizar una conexión serie-paralelo para alcanzar los valores deseados.



*Ilustración 20: Conexión tipo serie-paralelo.*

Antes de realizar las conexiones de los paneles solares es importante entender las advertencias del conexionado de paneles solares.

Primero conectar siempre la batería al regulador o al inversor y después a los paneles.

Usar reguladores solares que soporten la intensidad proveniente de los paneles de nuestra instalación.

No conectar en serie paneles de distintas potencias, células o modelos.

Se utiliza para hallar la corriente de carga el valor de intensidad a potencia máxima (IMP), no el de intensidad en cortocircuito (ISC).

Se utiliza para hallar la tensión de funcionamiento del panel, la tensión a potencia máxima ( $V_{mp}$ ). No se utiliza el valor de voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ ).

El valor de  $V_{oc}$  se utiliza para saber el máximo voltaje que puede obtener la instalación debido a la temperatura. (AutoSolar, 2019)

## 2.2.4 CÁLCULO DEL (EEDI).

$$\frac{\left( \prod_{j=1}^n f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}) + \left( \left( \prod_{j=1}^n f_j \right) \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{noff} f_{off(i)} \cdot P_{AEoff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} - \left( \sum_{i=1}^{noff} f_{off(i)} \cdot P_{off(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot f_1 \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}}$$

Ecuación 1, (OMI, 2018)

**C<sub>F</sub>**: Es un factor de conversión adimensional entre el consumo de Fuel y las emisiones de CO<sub>2</sub>, los subíndices ME(i) y AE(i) hace referencia a si es del motor principal (ME) o de los motores auxiliares (AE). El valor de CF se obtendrá de la siguiente tabla:

Type of fuel	Reference	Lower calorific value (kJ/kg)	Carbon content	C <sub>F</sub> (t-CO <sub>2</sub> /t-Fuel)
1 Diesel/Gas Oil	ISO 8217 Grades DMX through DMB	42,700	0.8744	3.206
2 Light Fuel Oil (LFO)	ISO 8217 Grades RMA through RMD	41,200	0.8594	3.151
3 Heavy Fuel Oil (HFO)	ISO 8217 Grades RME through RMK	40,200	0.8493	3.114
4 Liquefied Petroleum Gas (LPG)	Propane	46,300	0.8182	3.000
	Butane	45,700	0.8264	3.030

Tabla 1: Valores de Cf según combustible, (OMI, 2018)

El buque a estudio consume gas-oil, por lo que el valor de Cf a aplicar será igual a 3.206.

**V<sub>ref</sub>**: Velocidad de referencia medida en millas marinas por hora (nudos). El caso del estudio, al ser un buque de pasaje, las condiciones para medir la

velocidad de referencia el barco tendrá que estar cargado hasta la línea de calado de verano y en unas condiciones de navegación favorables, ni viento ni olas.

**Capacidad:** Para buques de pasajes se usará como capacidad el arqueo bruto según la convención internacional de medición de tonelaje de buques de 1696, anexo I, regla 3.

**P:** Es la potencia proyectada (medida en kW) tanto en motores principales como en auxiliares.

**P<sub>ME</sub>:** Potencia del motor principal, queda definida como el 75% de la potencia nominal instalada. (MCR).

**P<sub>AE</sub>:** Es la potencia del motor auxiliar requerida en condiciones de navegación a máxima carga, incluyendo la maquinaria y sistemas de navegación y la habilitación. Quedando fuera de esta potencia las hélices de proa, la bomba de carga y lastre etc....

Para buques con una potencia total instalada en motores principales mayor a 10.000kW, la P<sub>AE</sub> queda definida como:

$$P_{AE (\sum MCR_{ME(i)} \geq 10,000kW)} = \left( 0.025 \times \left( \sum_{i=1}^{nME} MCR_{ME(i)} + \frac{\sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)}}{0.75} \right) \right) + 250$$

*Ecuación 2: PAE, (OMI, 2018)*

En caso que la P<sub>AE</sub> calculada anteriormente sea significativamente diferente a la potencia total utilizada normalmente en la navegación, la P<sub>AE</sub> debe estimarse como la potencia consumida por el buque (excluida la propulsión) en condiciones de Vref.

**SPC:** Es el consumo específico de combustible en fase de proyecto, (medida en g/kWh) tanto en motores principales (SPC<sub>ME</sub>) como en auxiliares (SPC<sub>AE</sub>).



**fj:** Determina la corrección producida por los elementos específicos en el diseño del barco, en el caso de barcos de carga rodada o pasajeros con carga rodada, se obtiene de la siguiente manera.

$$f_{jRoRo} = \frac{1}{F_{n_L}^{\alpha} \cdot \left(\frac{L_{pp}}{B_s}\right)^{\beta} \cdot \left(\frac{B_s}{d_s}\right)^{\gamma} \cdot \left(\frac{L_{pp}}{\nabla^{1/3}}\right)^{\delta}}$$

Ecuación 3: fj roro, (OMI, 2018)

onde el número de Froude ( $F_{nL}$ ), es definido como:

$$F_{n_L} = \frac{0.5144 \cdot V_{ref}}{\sqrt{L_{pp} \cdot g}}$$

Ecuación 4: Número de Froude, (OMI, 2018)

y los exponentes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $\delta$  son definidos por la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, para nuestro estudio debemos utilizar los valores referidos al tipo de “buque de pasaje y carga rodada”.

Ship type	Exponent:			
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
Ro-ro cargo ship	2.00	0.50	0.75	1.00
Ro-ro passenger ship	2.50	0.75	0.75	1.00

Tabla 2: Coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $\delta$ , (OMI, 2018)

En caso de que el  $f_j$  calculado sea mayor que 1, se tomara como valor de  $f_j$  la unidad.

**$f_w$ :** El factor ambiental es un coeficiente no dimensional que indica la disminución de la velocidad en condiciones de mar representativas en cuanto a la altura y frecuencia de las olas y velocidad del viento (en la escala Beaufort). Para el cálculo del IEE conforme con las reglas 20 y 21 del anexo VI del convenio MARPOL,  $f_w$  es 1,0.

**$f_i$ :** Determina la capacidad para cualquier limitación técnica sobre la capacidad, deber suponer un valor de  $f_i = 1$  si no se ve necesario aplicar dicha corrección.

**$f_c$ :** Es el factor de corrección de capacidad cúbica, para buques de pasajes con carga rodada y con una relación  $DWT/GT < 0,25$  se debe aplicar el siguiente factor de corrección, de lo contrario  $f_c = 1$ .

$$f_{cRoPax} = \left( \frac{(DWT/GT)}{0.25} \right)^{-0.8}$$

*Ecuación 5:  $f_c$  ropax, (OMI, 2018)*

**$d_s$ :** El calado de verano se define como la distancia vertical en metros desde la línea base hasta la flotación correspondiente al calado del francobordo de verano.

**$B_s$ :** La manga en metros es definida como la anchura mayor moldeada del barco.

**$\nabla$ :** El volumen de carena ( $m^3$ ), el volumen de carena es el volumen limitado por el casco y la superficie de flotación.

**$g$ :** Define el valor de la aceleración de la gravedad ( $9,81m/s^2$ ).

### **2.2.5 CÁLCULO DE LA ENERGÍA GENERADA.**

Para calcular la energía generada se usó la herramienta PVGIS, el PVGIS es una calculadora de energía solar fotovoltaica gratuita en línea para sistemas autónomos o conectados a la red de sistemas y plantas fotovoltaicas en Europa, África, América y Asia. Esta implementada por el centro de investigación conjunta de los servicios científicos internos de la Comisión Europea. (EU Science Hub, 2020)

### **2.2.6 MÉTODO DE CÁLCULO DE ESTABILIDAD.**

Debido a la modificación de la distribución original de pesos, el incremento del desplazamiento en rosca y el cambio del KG como resultado de la nueva instalación, (ilustración 21) se debería realizar un cálculo de estabilidad para asegurarse que esta modificación cumpla con los criterios de estabilidad que garanticen su seguridad. Estos criterios pueden clasificarse según los parámetros que controlan en:

- Criterios en función de la altura metacéntrica.

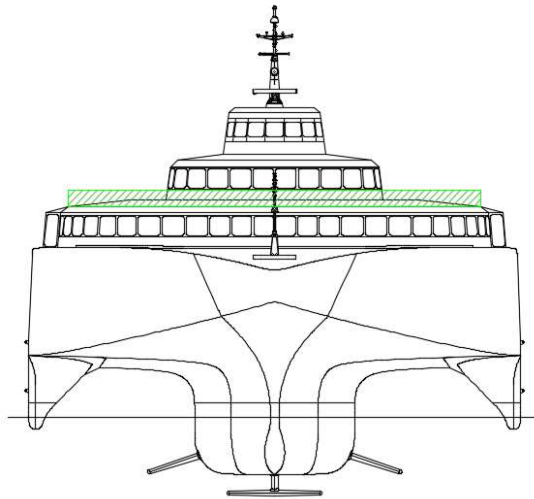
- Criterios en función de la estabilidad estática.

- Criterios en función de la estabilidad estática y dinámica.

- Criterios en función de la estabilidad estática y la acción del viento.

- Criterios en función del período y amplitud del balance.

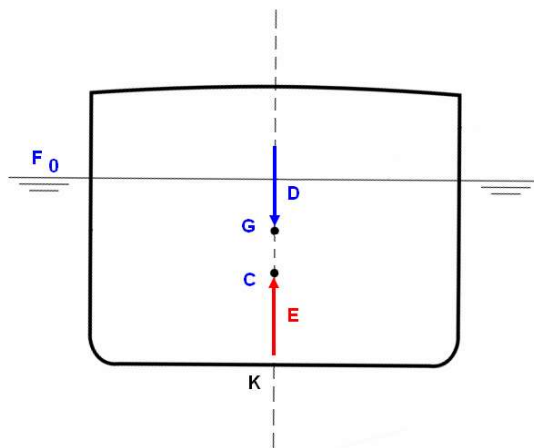
Existen también diferentes criterios creados para distintos tipos y tamaños de embarcaciones, dado que es muy amplia la variedad de buques y muy difícil que un solo criterio puede ser aplicado de forma universal. (Mayor H. G., 2011)



*Ilustración 21: Vista frontal con sección de módulos solares*

### 2.2.6.1 ESTABILIDAD TRASVERSAL INICIAL

Supóngase un buque en posición de equilibrio, cuyo corte transversal se muestra en la ilustración 22, el desplazamiento  $D$ , aplicado en el centro de gravedad  $G$ , se ve equilibrado por el empuje  $E$ , aplicado en el centro de carena  $C$ .



*Ilustración 22: Estado inicial de equilibrio , (Mayor H. G., 2011).*

Si por acción de un momento externo el buque es llevado a la posición indicada en la ilustración 23, adoptando un ángulo respecto de la vertical denominado  $\varphi$  y luego dejado libre, podemos decir:

El desplazamiento se mantiene invariable y aplicado en G.

El Empuje también se mantiene constante pues su carena lo es, pero no así su forma, por lo que el centro de carena se desplaza a la posición C1. Se genera así una nueva recta de acción y un momento adrizante  $\overrightarrow{Mon} = D \cdot \overrightarrow{GZ}$ , que tiende a hacer regresar al buque a la posición inicial.

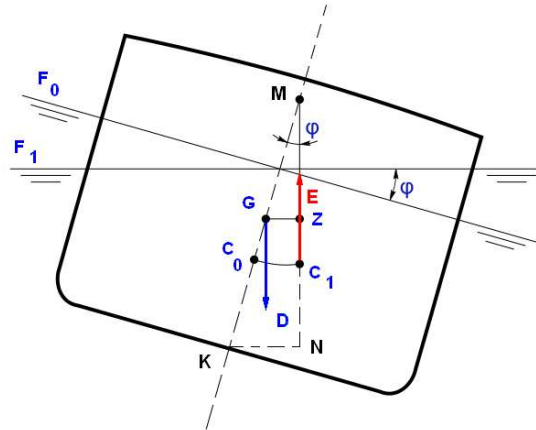


Ilustración 23: Estado final del periodo de escora , (Mayor H. G., 2011).

El secreto para comprender el efecto de la estabilidad transversal de un buque radica en entender que todas las fuerzas se mantienen constantes, pero no así el punto de aplicación del empuje que, merced a la forma del casco, hace que el centro de gravedad del volumen de agua desplazado, esto es, el centro de carena o empuje, se desplace lateralmente dando origen al brazo adrizante.

## 2.2.6.2 DETERMINACIÓN DEL BRAZO ADRIZANTE

Del triángulo rectángulo formado por los puntos GZM (ilustración 23) se deduce que,  $\overrightarrow{GZ} = \overrightarrow{GM} * \sin \varphi$  por lo que debemos abocarnos a la determinación del segmento  $\overrightarrow{GM}$  (altura metacéntrica) para poder cuantificar el brazo adrizante  $\overrightarrow{GM} = \overrightarrow{KM} - \overrightarrow{KG}$ .

La coordenada vertical del punto M ( $\overrightarrow{KM}$ ) es una variable en función del calado del buque, es decir de la condición de carga en el instante considerado. Se obtiene de las “curvas de atributos de carena” suministradas por el astillero.

Resta ahora determinar  $\overrightarrow{KG}$  esto es, la posición vertical del centro de gravedad del buque. El que también es una variable y depende entre otros muchos factores de la distribución de pesos a bordo.

Este valor surge de la aplicación del concepto de sumatorias de momentos estáticos respecto de un plano (teorema de Varignon). Es decir, en un sistema de fuerzas, el momento de la resultante es igual a la sumatoria de los momentos de las componentes parciales.

Para efectuar esta sumatoria se cuenta a bordo con planillas que contemplan cada uno de los compartimentos de carga, tanques de combustible, lastre, provisiones y por supuesto el peso y posición del C de G del buque vacío. En la actualidad todos estos cálculos se efectúan mediante programas de ordenadores que no solo agilizan la operación, sino que aseguran la exactitud.

### 3. APLICACIÓN PRÁCTICA.

#### 3.1 CÁLCULO DEL IEE INICIAL.

Como primer paso para intentar mejorar la eficiencia del buque estudiado se necesita saber el IEE actual, el cual se ha calculado de la siguiente forma:

##### CÁLCULO MOTORES PRINCIPALES (ME).

**Combustible** = MGO.

$$\mathbf{MCR_{MP}} = 4 \times 10.000 \text{ kW} = 40.000 \text{ kW}.$$

$$\mathbf{P_{ME}} = 40.000 \times 0,75 = 30.000 \text{ kW}.$$

$$\mathbf{SFC_{ME}} = 189 \text{ gr/kWh} = 0,000189 \text{ t/kWh}$$

$$\mathbf{CF_{ME}} = 3.206 \text{ tCO}_2/\text{t fuel}$$

$$\mathbf{P_{ME} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}} = 30.000 \times 3.206 \times 0,000189 = 18.178 \text{ tCO}_2/\text{h}$$

##### CÁLCULO MOTORES AUXILIARES (AE).

**Combustible** = MGO.

$$\mathbf{PT_{AE}} = 4 \times 575 \text{ kW} = 2.300 \text{ kW}.$$

$$\mathbf{P_{ME} > 10.000 \text{ kW} \rightarrow P_{AE} = (0,025 \times 40.000) + 250 = 1.250 \text{ kW}.$$

$$\mathbf{P_{AE} \text{ (navegación)} = 330 \text{ kW}}$$

$$\text{Cómo } P_{AE} \gg P_{AE} \text{ (navegación)} \rightarrow \mathbf{P_{AE} = 330 \text{ kW}}$$

$$\mathbf{SFC_{AE}} = 200 \text{ gr/kWh} = 0,0002 \text{ t/kWh}$$

$$\mathbf{CF_{AE}} = 3.206 \text{ tCO}_2/\text{t fuel}$$

$$\mathbf{P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}} = 330 \times 3.206 \times 0,0002 = 211,6 \text{ tCO}_2/\text{h}$$

## CALCULO DE LOS FACTORES DE CORRECCIÓN APLICADOS AL BARCO:

$$L_{pp} = 116,85 \text{ m.}$$

$$B_s = 30,4 \text{ m.}$$

$$d_s = 3,98 \text{ m.}$$

$$V_{ref} = 36 \text{ knot.}$$

$$GT = 8.973 \text{ t.}$$

Aplicando los valores anteriores a la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se obtendrá el valor del número de Froude:

$$F_{NL} = \frac{0,5144 * 36}{\sqrt{116,85 * 9,81}} = 0,5469$$

por definición se sabe que:

$$\Delta = \nabla * \rho$$

$$\nabla = \frac{2.509.000 \text{ kg}}{1.027 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 2.443,0379 \text{ m}^3$$

Entrando en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** como barco de pasaje y carga rodada se sustituyen los valores en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y fj queda de la siguiente manera:

$$f_j = \frac{1}{0,5469^{2,5} * \left(\frac{114,8}{30,4}\right)^{0,75} * \left(\frac{30,4}{3,98}\right)^{0,75} * \left(\frac{114,8}{2.443^{1/3}}\right)^1} = 0,042$$

$$f_w = 1$$

$$f_i = 1$$

Para el cálculo de  $f_c$  se deberá calcular primero la relación DWT/GT.

$$\frac{1.000}{8.973} = 0,11$$



Como el valor obtenido es menor que 0,25 se deberá usar la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, sustituyendo los valores quedará:

$$f_c = \left( \frac{(1.000/8.973)}{0,25} \right)^{-0,8} = 1,92$$

### **CALCULO DEL EEDI.**

Con los datos obtenidos en los apartados anteriores y sustituyendo en la ecuación 1 obteniendo así el EEDI del barco sin ningún tipo de mejora.

$$EEDI = \frac{(0,042 * 18.178^{tCO_2/h}) + 211,6^{tCO_2/h}}{1 * 1,92 * 1 * 8.973t * 1 * 36^{milla/h}}$$

$$EEDI = 1.572,2^{gCO_2/t\ milla}$$

### **3.2 CÁLCULO DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA.**

La instalación planteada aunque a priori se podría definir como una instalación autónoma, realmente se muestra como una instalación conectada a una red (ilustración 26), la idea es que la electricidad producida por los módulos se vierta directamente al cuadro de distribución del barco (ilustración 15), de esta forma se consigue quitarle trabajo a los motores auxiliares y por consiguiente la disminución de consumo de combustible dedicado a la generación de electricidad.

Teniendo en cuenta la geometría del barco, la mayor superficie libre para colocar los módulos solares está situada en la “observación deck”, en esta cubierta se disponen en total de 1.123 m<sup>2</sup> de superficie libre.

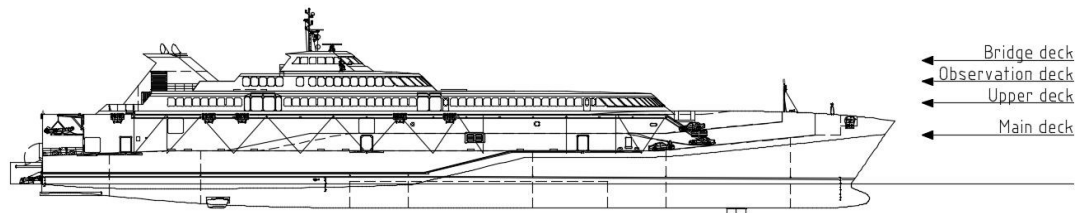


Ilustración 24: Plano de cubiertas.

Debido que el barco dispone de un punto de extracción en caso evacuación de un pasajero y/o tripulante mediante helicóptero con “winch” la superficie útil para la colocación de los módulos solares se ve reducida a 946 m<sup>2</sup>, en la ilustración 25 se puede diferenciar dichas zonas, en color rojo la superficie destinada a la evacuación y la verde a la colocación de módulos solares.

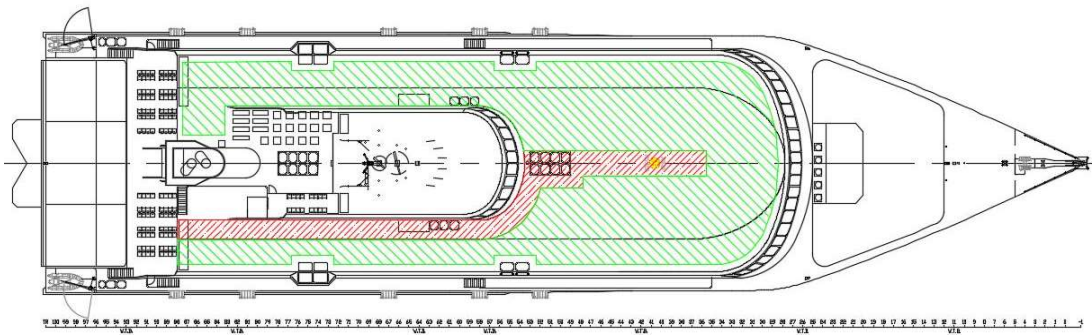


Ilustración 25: Plano de superficies libre para instalación.

Sabiendo la superficie total se podrá conocer cuántos módulos fotovoltaicos se pueden instalar y que potencia de pico es capaz de generar la instalación, el método que se sigue para su cálculo es el siguiente:

Primero se empieza calculando la superficie que ocupa cada placa solar según información del fabricante ( $A_{PS}$ ):

$$A_{PS} = L_{\text{módulo FV}} * A_{\text{módulo FV}}$$

Haciendo una simple relación entre la superficie total y la de cada placa obtenemos el número máximo de módulos a instalar ( $N_{PS}$ ).

$$N_{PS} = \frac{\text{Superficie total}}{A_{PS}}$$

Tras conocer el número de módulos a instalar y la potencia generada unitaria y según fabricante se calcula la potencia pico total generada.

$$P_{TG} = N_{PS} * P_{\text{max módulo}}$$

Para saber qué tipo de módulos fotovoltaicos se van a instalar, primero se debe estudiar todas las posibles soluciones técnicas que nos ofrece el mercado y elegir la más adecuada para la óptima explotación de la instalación.

A la hora de diseñar cualquier tipo de instalación siempre se busca la máxima eficacia, pero sin perder de vista los costes, y en este caso la premisa no va a ser diferente, hay que buscar componentes que generen el máximo partido a la instalación manteniendo un costo ordenado.

En base a la característica explicada en el “2.2.3 Descripción de los sistemas fotovoltaicos” los paneles a instalar serán monocristalinos por tener un mayor rendimiento y flexible que son los indicados para instalaciones en buques debido que se adapta muy bien a la forma de la cubierta. Una solución muy optima viene de la mano de Solmax con su panel SZ-160-36MFE, un panel flexible con un rendimiento del hasta el 17,7% siendo especialmente indicado para instalaciones en embarcaciones. Sus características son:

	Costo Ud. (€)	Potencia (W)	Área (m2)	Eficiencia (%)
<b>Solmax SZ-160-36MFE</b>	307	160	1,01	17,7

*Tabla 3: Características módulo SZ-160-36MFE , (AutoSolar, 2020)*

Como se vio anteriormente, la superficie a cubrir por la instalación fotovoltaica es de 946 m<sup>2</sup>, sabiendo esto y usando la tabla anterior nos queda que:

	Nº Módulos	Costo Total (€)	Potencia Instalada(kW)	Relación €/kW
<b>Solmax SZ-160-36MFE</b>	937	287.547	150	1.918,8

*Tabla 4: Cálculos base panel SZ-160-36MFE.*

Otra opción viable es la instalar un panel rígido policristalino, en concreto el “JKM320PP” de la marca Jingo Solar, aunque no es un módulo diseñado específicamente para la instalación en buques, dispone de dos características muy interesantes para la instalación, una es su alta resistencia a la brisa marina y la otra a las rachas de viento de hasta 2.400  $N/m^2$ , además es un panel que no tiene degradación producida por PID. Teniendo en cuenta que el barco realiza rutas de cabotaje insular y que la cubierta donde se va a colocar la instalación está a una cota de +17 metros sobre la quilla hace que sea bastante improbable que la instalación entre en contacto directo con el agua del mar, haciendo que este tipo de panel sea otra alternativa para la instalación. Sus características son:

	Costo Ud. (€)	Potencia (W)	Área (m2)	Eficiencia (%)
<b>Jingo JKM320PP</b>	275	320	2,93	16,46

*Tabla 5: Característica módulo Jingo JKM320PP , (AutoSolar, 2020)*

Ejecutando los mismos cálculos en base a los de 946 m<sup>2</sup> de instalación a cubrir, tenemos que:

	N.º Módulos	Costo Total (€)	Potencia Instalada(kW)	Relación €/kW
<b>Jinco JKM320PP</b>	490	134.793	157	431,25

*Tabla 6: Cálculos base panel Jinco JKM320PP.*

Tomando como base los datos obtenidos con el panel “JKM320PP” obtendremos una tabla en valores porcentuales con la cual podremos comprar ambas soluciones y elegir la más que se adecua a la instalación.

	N.º Módulos	Costo Total	Potencia Instalada	Relación €/kW
<b>Solmax SZ-160-36MFE</b>	+ 91,09 %	+ 113,32 %	-4,46 %	+ 344,93 %
<b>Jinco JKM320PP</b>	490	134.793€	157 kW	431,25

*Tabla 7: Comparativa Solamax SZ-160-35 MFE vs Jinco JKM320PP.*

Haciendo una lectura rápida y despreciando la pequeña variación de potencia instalada, se puede ver como los costes aumentan en términos relativos un 113,32% en comparación con el otro tipo de placas, por lo tanto, los módulos a instalar en el buque serán los “JKM320PP” de la marca Jinco, siendo estas sus características principales.

Tipo de módulo	JKM320PP	
	STC	NOCT
Potencia nominal (P <sub>máx</sub> )	320Wp	238Wp
Tensión en el punto P <sub>máx</sub> -VMPP (V)	37.4V	34.7V
Corriente en el punto P <sub>máx</sub> -IMPP (A)	8.56A	6.86A
Tensión en circuito abierto-VOC (V)	46.4V	43.7V
Corriente de cortocircuito-ISC (A)	9.05A	7.30A
Eficiencia del módulo (%)	16.49%	
Dimensiones	1956 x 992 x 40mm	

Tabla 8: Datos módulo SP-JKM-320PP , (Jinko Solar, 2013)

Como se puede observar en la ilustración 26 sólo queda dimensionar el inversor para poder conectar el sistema fotovoltaico al sistema de distribución del barco.

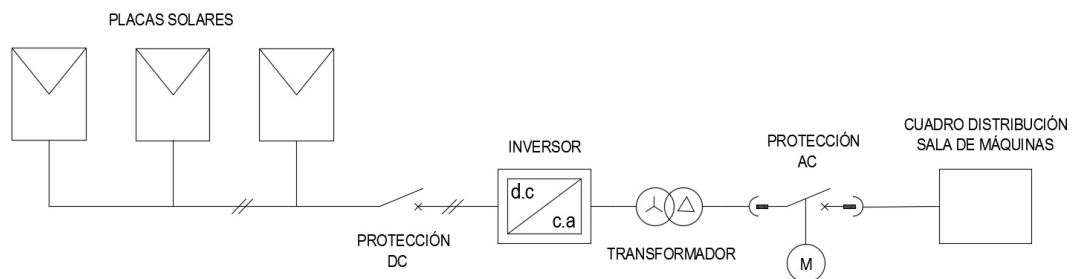


Ilustración 26: Esquema tipo de una instalación fotovoltaica de inyección.

Al estar el inversor aguas debajo de los paneles solares, la elección del viene dada por las características de salida de los módulos solares, aunque según lo expuesto en el apartado “2.2.3.3 Inversores” se buscó un inversor centralizado debido a la simplicidad de la instalación y a la menor saturación

de aparamenta en la cubierta de instalación. Por todo ello se eligió uno de la marca Aros modelo “*sirio K100*”, un inversor que dispone de un buen abrochamiento energético, una reducción de potencia térmica, función que permite proteger a los semiconductores del inversor a causa de problemas en la ventilación forzada, además dispones de un interfaz de usuario intuitiva y una facilidad de instalación y de mantenimiento, a continuación, se muestran sus principales características. (Aros Solar Technology, 2020),

Modelo	SIRIO K100
Potencia nominal corriente alterna	100KVA
Potencia máxima corriente alterna	100KW ( $\cos\phi=1$ )
<b>ENTRADA</b>	
Tensión de continua máxima en circuito abierto	880Vcc
Rango completo de MPPT	330÷700Vcc
Intervalo de ejercicio	330÷700Vcc
Corriente de entrada máxima	320Acc
Número de entradas	1
<b>SALIDA</b>	
Tensión de ejercicio	400Vca
Corriente nominal	145Aca
Corriente máxima	160Aca
Corriente de cortocircuito	274Aca
Distorsión armónica (THDi)	<3%

Tabla 9: Datos inversor Sirio K100 , (Aros Solar Technology, 2020)

Para configurar la matriz de conexión de los módulos se deberán tener en cuenta los parámetros de la tabla 9 correspondiente a la tensión de entrada, corriente máxima y número de entradas, en este caso el inversor sólo dispone de una única entrada. (Lorenzo J. A., s.f.)

Para mantener la instalación dentro de los parámetros de funcionamiento del inversor se debe conectar del siguiente modo.

### 3.2.1 AJUSTE LA TENSIÓN DE ENTRADA:

Con una división entre la tensión de entrada del inversor y la tensión generada por cada placa que se vaya instalar no dará como resultado el número de módulos necesarios:

$$N^{\circ}mod_{.serie} = \frac{V_{max_{inversor}}}{V_{oc_{placa}}} = \frac{649,6}{46,4} = 14 \text{ módulos}$$

$$V_{salida} = 14 * 46,4 = 649V$$

El esquema tipo quedaría tal que:

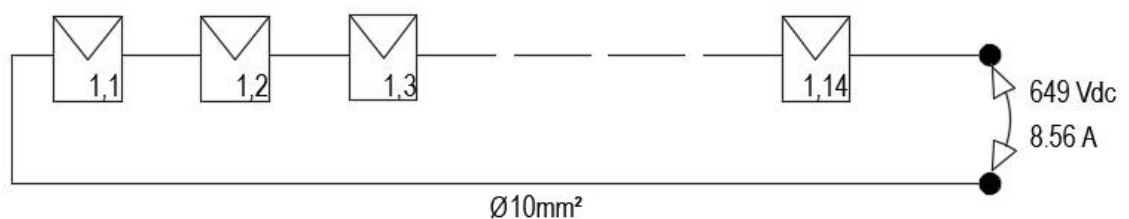


Ilustración 27: Ajuste de tensión para el inversor



### 3.2.2 AJUSTE LA INTENSIDAD DE ENTRADA:

Para ajustar el amperaje de entrada al inversor se debe conocer cuántos módulos se conectarán en paralelo y así poder conformar el matiz del sistema de generación.

$$N^{\circ} mod.paralelo = \frac{I_{max\,inversor}}{I_{cc\,placa}} = \frac{320}{9,05} = 35 \text{ módulos}$$

En la ilustración 28 muestra el esquema tipo de como deberían de realizarse las conexiones para adecuar la instalación de los módulos solares al inversor de salida. No se puede obviar la tensión de salida del inversor, en este caso es de 400 Vac y el sistema de barras es de 690 Vac, por lo tanto, se debe intercalar entre las protecciones y el embarrado un transformador de 400/690 Vac de 110kVA.

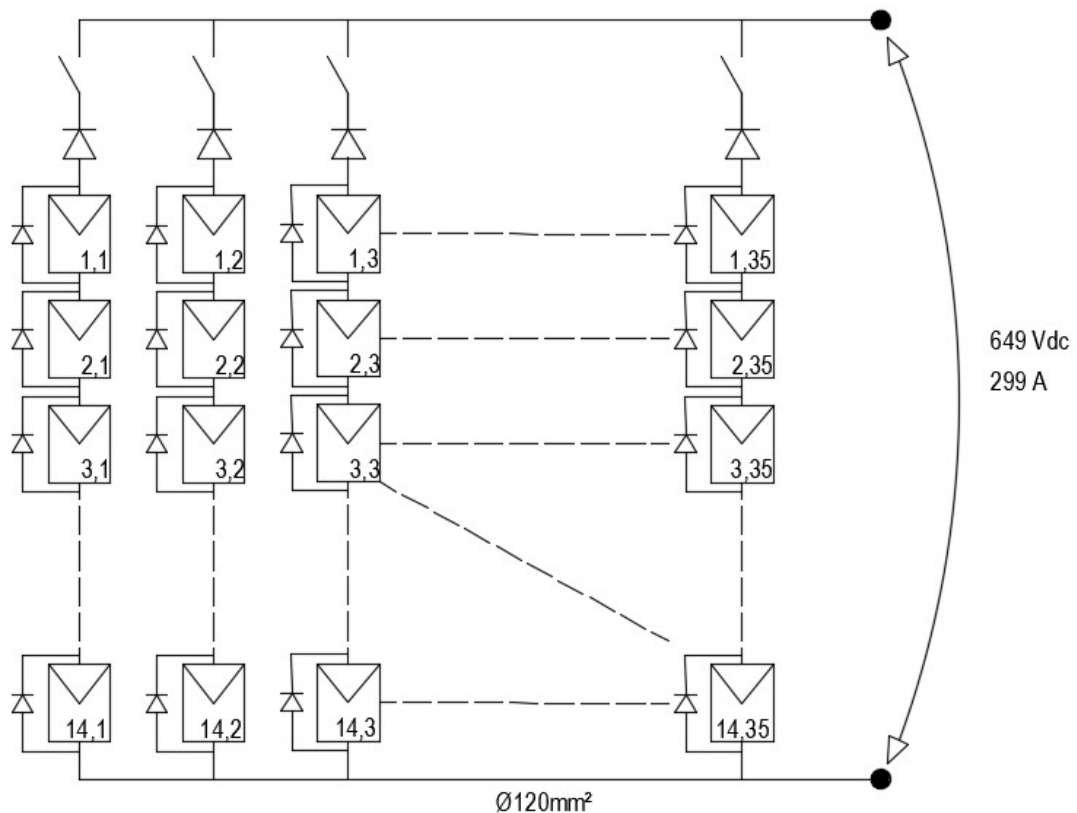


Ilustración 28: Esquema de conexión de los módulos fotovoltaicos

Para calcular la protección del sistema debemos saber la intensidad del primario ( $I_p$ ) y con la relación de transformación se calculará la intensidad que circulará por el secundario ( $I_s$ ) y en consecuencia se elegirá la protección.

$$P_t = \sqrt{3} * V_l * I_l * \cos \varphi \rightarrow I_l = \frac{P_t}{\sqrt{3} * V_l * \cos \varphi}$$

$$I_l = \frac{100.000}{\sqrt{3} * 400 * 0,9} \approx 160 \text{ A.}$$

$$rt = \frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} \rightarrow I_s = \frac{V_p}{V_s} * I_p = \frac{400}{690} * 160 \approx 93 \text{ A}$$

Con esta intensidad de secundario se colocará una protección de 110 A, teniendo así un margen de seguridad. En la ilustración 29 se observa el nuevo esquema de la distribución del buque con la incorporación de los paneles solares.

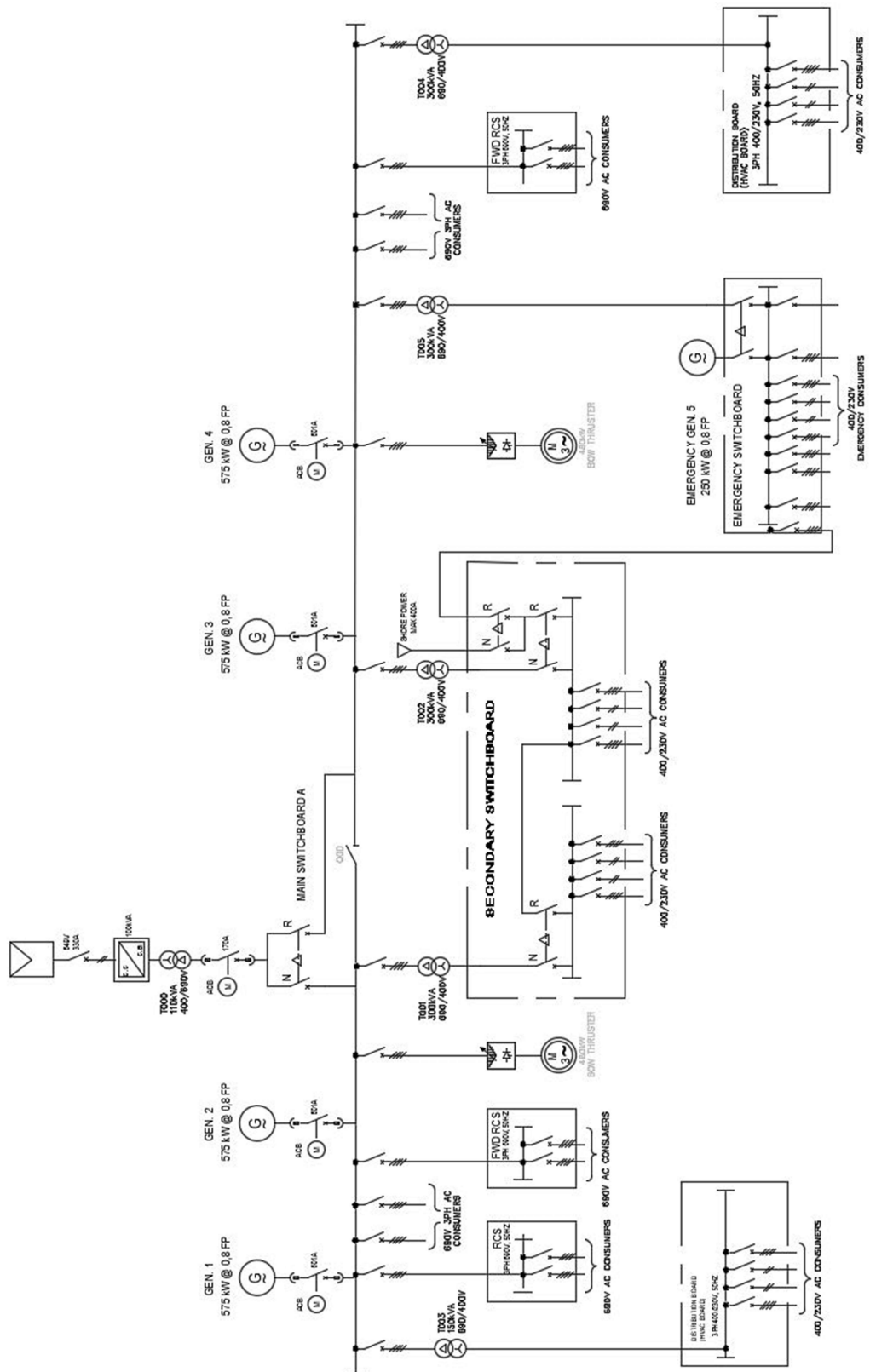
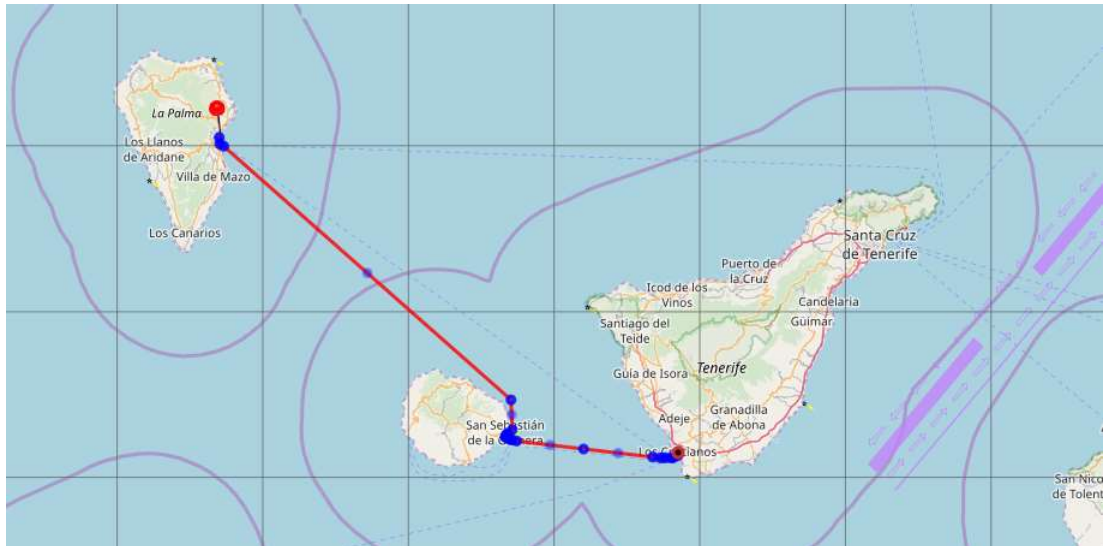


Ilustración 29: Esquema de distribución con generación fotovoltaica.

### 3.3 CÁLCULO DE LA ENERGÍA GENERADA.

En Benchijigua Express realiza principalmente navegaciones entra la isla de La Gomera y Tenerife, por lo tanto, se cogerá una posición intermedia entre la Gomera y Tenerife para el cálculo de la producción de energía, una vez seleccionada la posición introducimos los datos que solicita el programa para los cálculos (ilustración 31).

Como esto no es una instalación terrestre y no permanece inmóvil se ha decidido que tanto la inclinación como el azimut tengan un valor de cero así poder maximizar su rendimiento en cualquier posición del buque.



*Ilustración 30: Navegación del Benchijigua Express.*

Como ya se mencionó anteriormente, la potencia total generada viene definida por el número de módulos y la potencia máxima por módulo, quedando:

$$P_{TG} = N_{PS} * P_{\max \text{ módulo}} = 490 * 320 \approx 157kW_p$$

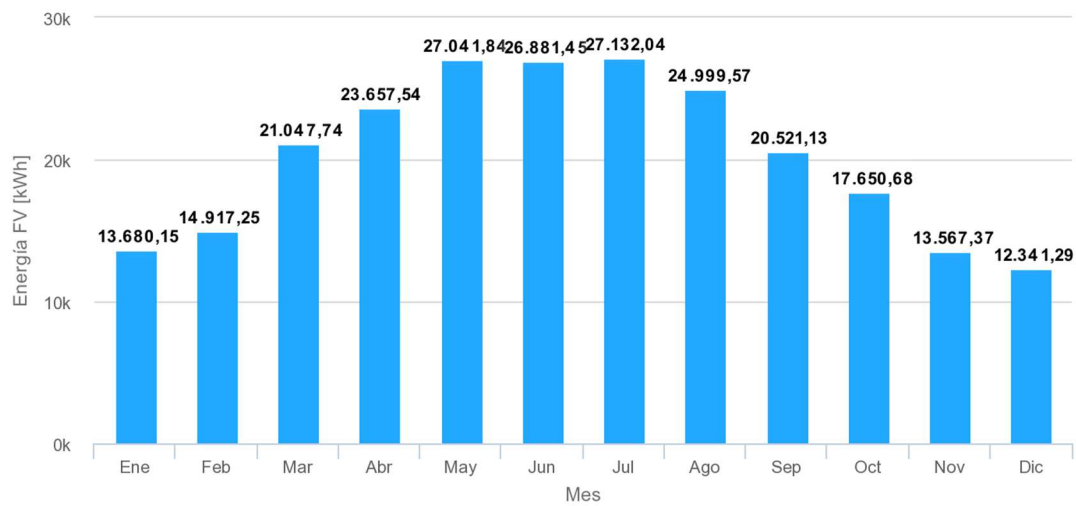
Ilustración 31: Datos solicitados por el PVGIS , (EU Science Hub, 2020)

Una vez introducidos todos los datos, el programa nos genera varios resultados, la gráfica 6 muestra la producción de energía por meses a lo largo de un año y en gráfica 7 se observa la irradiación sobre el sistema, también mostrado por meses y lo largo de un año.

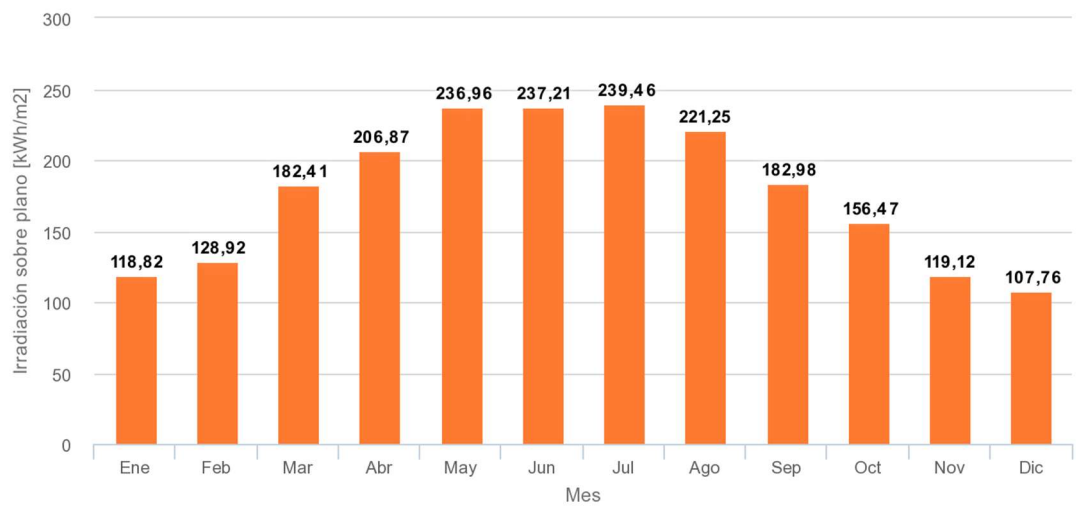
El dato más relevante para el desarrollo de este trabajo se muestra en la ilustración 32, este indica cual es la producción energética anual de nuestro sistema, esta energía será la que al final se transformará en reducción de emisiones y ahorro de combustible.

Resultados de la simulación:	
Ángulo de inclinación [°]:	0
Ángulo de azimut [°]:	0
<b>Producción anual FV [kWh]:</b>	<b>243438.05</b>
Irradiación anual [kWh/m <sup>2</sup> ]:	2138.23
Variación interanual [kWh]:	9651.99

Ilustración 32: Datos obtenidos del PVGIS , (EU Science Hub, 2020)



Gráfica 6: Producción de energía anual del sistema , (EU Science Hub, 2020)



Gráfica 7: Irradiación anual sobre el sistema , (EU Science Hub, 2020)

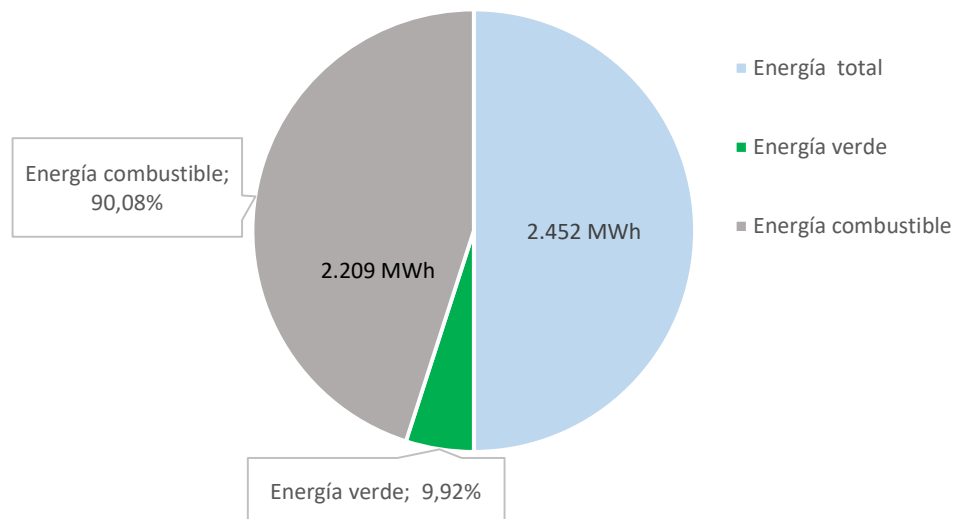
El barco por término general navega unas 16 horas diarias con una potencia media generada de 330kW, durante la parada nocturna su potencia de generación baja a unos 180kW durante las 8 horas que dura esta. Esto hace una energía total producida al día de:

$$E_{24h} = (330kW * 16h) + (180kW * 8h) = 6.720kWh$$

Al año implica una energía producida de:

$$E_{año} = 6.720kWh * 365 días = 2.452MWh$$

Si se compara este valor con el de la ilustración 32, se podrá ver la reducción de energía producida (gráfica 8).



Gráfica 8: Balance energético anual.

### 3.4 CÁLCULO DEL NUEVO IEE.

Se toma como premisa de que, al estar conectado el sistema fotovoltaico a las barras de distribución, habrá una disminución de la carga de los motores auxiliares, por lo tanto, la única variación con el cálculo original será esa.

$$P_{AE} (\text{navegación}) = 330kW$$

$$P_{solar} = \frac{100}{0,9} = 90kW$$

$$P_{AE} = P_{AE \text{ navegación}} - P_{solar} = 330 - 90 = 240kW$$

$$SFC_{ME} = 200gr/kWh = 0,0002 t/kWh$$

$$CF_{MA} = 3.206 tCO_2/t \text{ fuel}$$

$$P_{AE} * C_{FAE} * SFC_{AE} = 240 * 3.206 * 0,0002 = 153,8 tCO_2/h$$

Con este nuevo dato, se volverá a calcular el EEDI, el cual presumiblemente es inferior al original debido a implementación de la energía solar.

$$EEDI = \frac{(0,042 * 18.178 tCO_2/h) + 153,8 tCO_2/h}{1 * 1,92 * 1 * 8.973t * 1 * 36 \text{ milla}/h}$$

$$EEDI = 1.479 gCO_2/t \text{ milla}$$



### 3.5 CÁLCULO DE ESTABILIDAD.

Lo primero que se debe conocer es el peso extra añadido a la cubierta del buque, (descartando el peso del inversor, debido a que su emplazamiento será en la sala de máquinas) y lo segundo debe ser definir las coordenadas del centro de masa de la instalación en función de las líneas de referencia.

Según las hojas de características suministras por los fabricantes el desglose del peso añadido a la cubierta sería:

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PESO UNITARIO (Kg)	PESO TOTAL (Kg)
Panales solares	490	26.5	12.985
Estructura	164	15	2.460
Cable	400 m	85 (Kg/Km)	34
<b>TOTAL</b>			<b>15.479</b>

*Tabla 10: Distribución pesos de la instalación fotovoltaica.*

Este peso representa alrededor del 1,9% del total de carga del barco, por lo que a priori no se tendrá problemas de estabilidad, pero se realizará el cálculo para tener la certeza de que no se compromete la seguridad del buque.

Lo primero que se debe de realizar es acotar la instalación en función de las líneas de referencia del buque, quedando de la siguiente manera.

**VCG:** altura del centro de gravedad sobre la quilla; **VCG = 17.62m.**

**TCG:** distancia medida desde la línea central, siendo positiva cuando el punto se encuentra en estribor y negativa cuando lo está a babor, en este caso se toma **TCG = 0** debido a que es una gran superficie que ocupa de banda a banda.

**LCG:** distancia tomada desde la perpendicular de popa; **LCG = 80,7m.**

Para realizar los cálculos se ha empleado la hoja de estabilidad usada en el buque, pero se ha añadido el peso de la instalación para así cumplir con los criterios del trabajo. El resultado es:

Displazament (t)	Mean Draught (m)	Draught LCF (m)	LWL (m)	LCB (m)	LCF (m)	KB (m)	Kmt (m)	KMI (m)
1900,765	2,869	3,159	119,24	43,04	41	1,841	13,06	351,90

LCG	36,66
VCG	7,04
TCG	-0,04

GC(Triming Arm)	6,386	Aft Trim
GML	344,864	
Trim	2,063	m

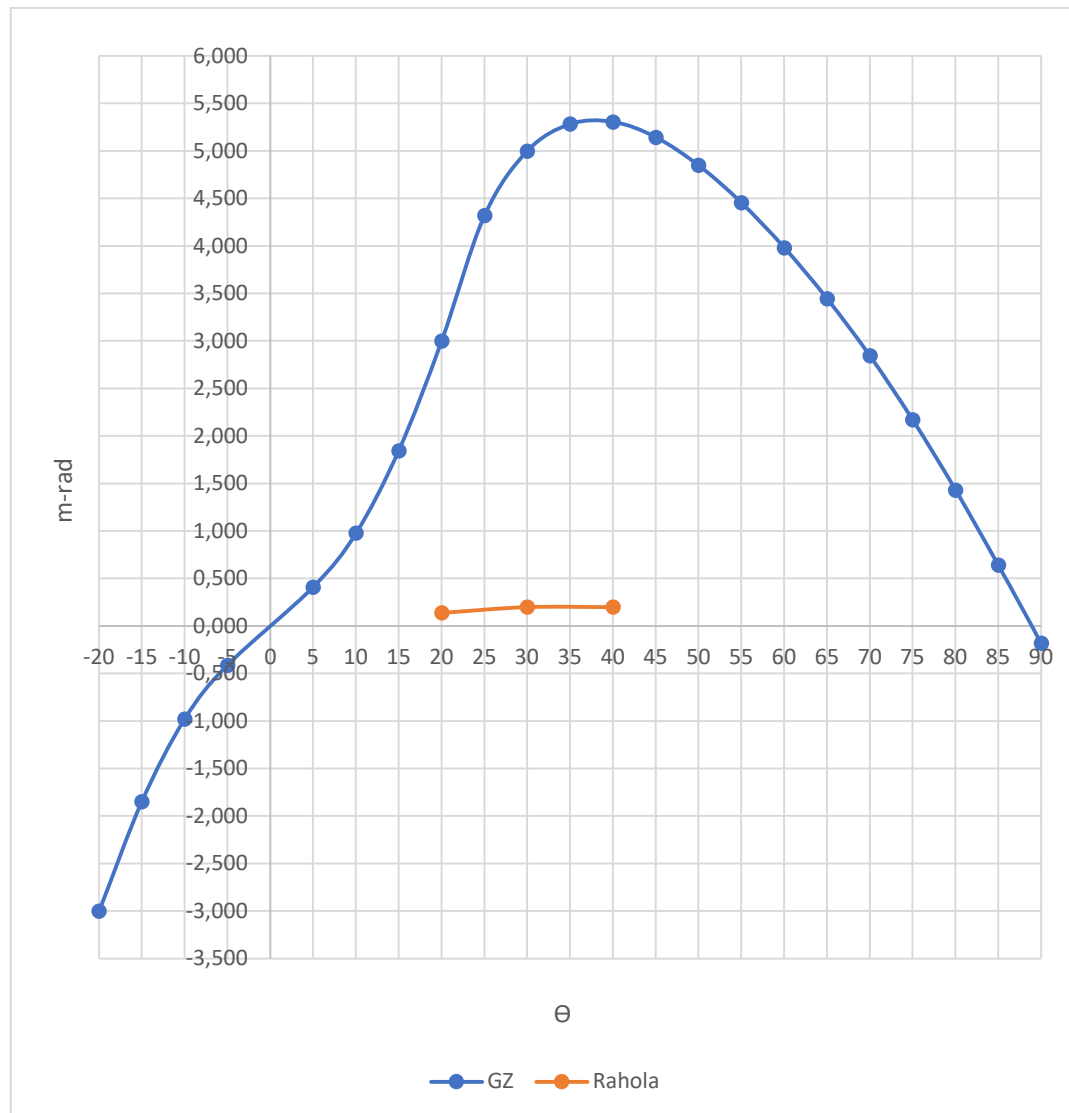
Trim from AP to LCF	0,709		Trim from FP to LCF	-1,354	m
Draft at aft marks	3,578	m	Draft at fwd marks	1,515	m

STABILITY CRITERIA				
GM	6,0224			
GMc	5,8605	>0,15	m	Pass
Area B - Area A	1,0937	>0	m-rad	Pass
$\Theta_{PZ}$	6,4923	<10	°	Pass
$\Theta_{TL}$	4,4588	<10	°	Pass
Area 0-30	1,1085	>0,055	m-rad	Pass
Area 30- $\Theta_F$	0,2662	>0,03	m-rad	Pass
GZ at 30	4,9995	>0,2	m-rad	Pass
Angle of Max GZ	40	>15	°	Pass

Las dos primeras filas son las de la hidrostática con el trimado correspondiente a los calados obtenidos de la condición de carga del buque. Las celdas LCG, VCG y TCG se corresponden con los valores del centro de gravedad (longitudinal, vertical y transversal) de la condición de carga del buque. A continuación se presentan los valores del brazo de trimado, si trima por popa o por proa, el radio metacéntrico longitudinal (GML) y el trimado final.

En la zona "Stability Criteria" se presentan los diferentes criterios de estabilidad con cuatro datos para cada uno: valor obtenido de la condición actual de carga; unidades; valor límite de la reglamentación; y si cumple el

criterio (“Pass”) de la administración o no (“No Pass”). Finalmente se representa en la gráfica 9 los valores de los GZ y el criterio de Ráhola.



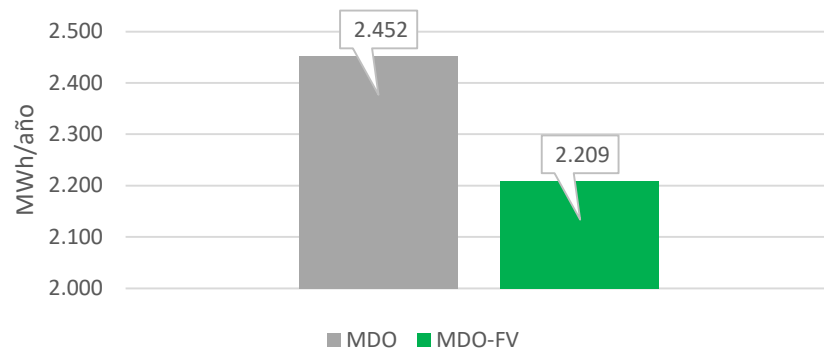
Gráfica 9: Valores GZ y criterio de Ráhola.

### 3.6. ESTUDIO TÉCNICO COMPARATIVO

Este apartado pretende mostrar de una forma fácil y concisa las reducciones derivadas de la incorporación de la instalación fotovoltaica al sistema de generación del buque. Para ello se evaluaron los siguientes parámetros:

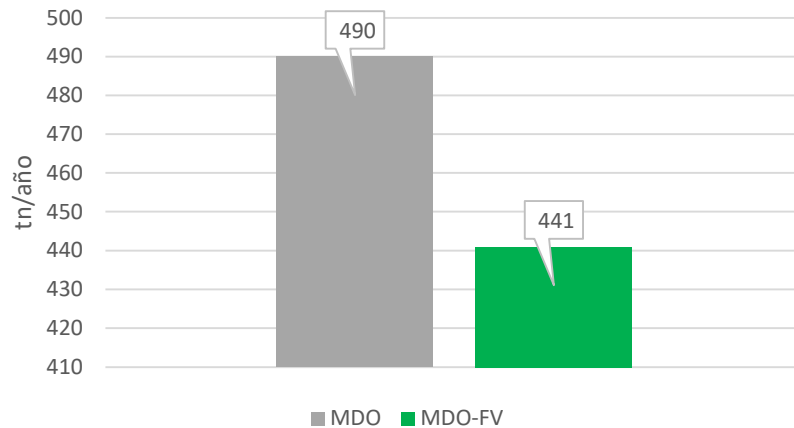
#### **Energía suministrada por los motores auxiliares.**

La gráfica 10 representa la disminución anual de la energía producida por los motores auxiliares con la incorporación de la nueva instalación de producción, esta rebaja de casi  $243MWh/año$  se podría traducirse en una reducción del mantenimiento en  $733h/año$ .



Gráfica 10: Comparativa de la energía producida por los motores auxiliares.

### Consumo de los motores auxiliares.

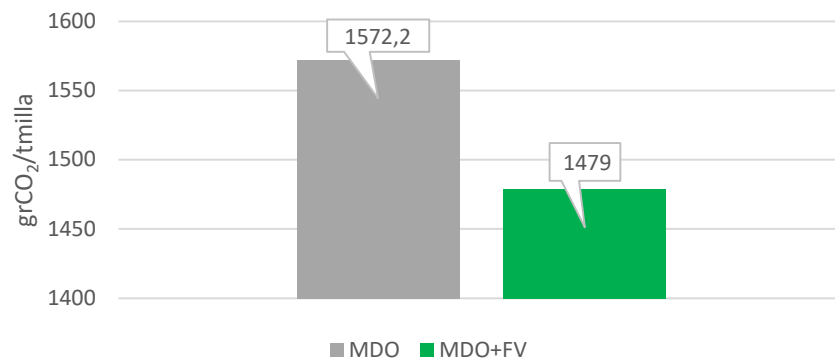


Gráfica 11: Comparativa del consumo de los motores auxiliares.

Evidentemente una disminución en la producción de energía acarrea un descenso en el gasto de combustible (gráfica 11). Esto implica que los  $243MWh/año$  que se vio en el apartado anterior equivalen a una reducción que ronda cerca de las 47tn de combustible al año.

### Índice EEDI.

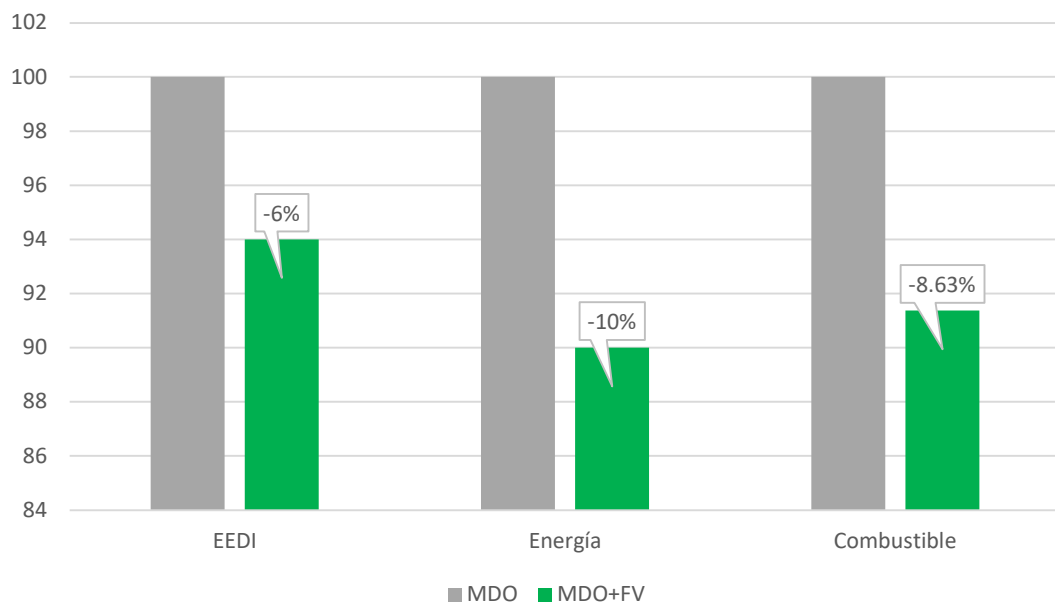
Aparte de lo mencionado anteriormente, la incorporación de la instalación fotovoltaica al buque repercute en la disminución de la cantidad de  $CO_2$  vertido a la atmósfera (gráfica 12). Sabiendo que el barco como norma general navega 77.380 millas al año el decremento del índice EEDI supone que anualmente se dejen de emitir casi 9.000t de  $CO_2$  a la atmósfera.



Gráfica 12: Comparativa de los índices EEDI.

A la vista de las gráficas anteriores se hace un poco tedioso tener una idea en conjunto de como interaccionan todos los términos entre sí, para ello la Gráfica 13 hace una representación porcentual haciendo más fácil su comparación.

Por ejemplo, se puede ver como la disminución de la cantidad de combustible de los motores auxiliares (8,63%) no está totalmente ligada a la disminución del índice EEDI (6%), esto es debido a que en el cálculo del EEDI entran otros factores como puede ser el consumo de los motores principales.

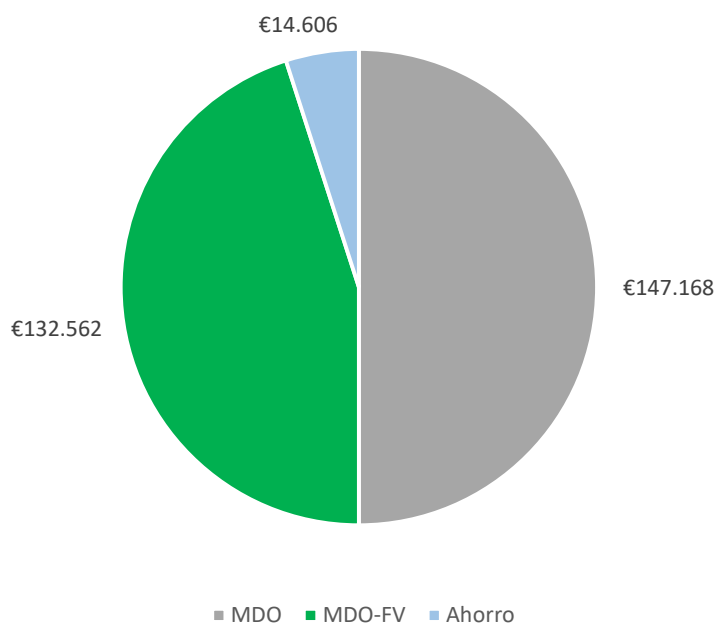


Gráfica 13: Resumen de reducciones en valores porcentuales.

### 3.7 ESTUDIO ECONÓMICO DE LA INSTALACIÓN

Según lo visto anteriormente (Gráfica 13), el buque genera un ahorro en combustible de cerca de 47t anuales, haciendo una estimación aproximada del precio del combustible de  $300\text{€}/t$ , generando al armador un ahorro anual de 14.606€ en combustible.

En la gráfica siguiente se puede observar la variación de coste antes y después de la instalación fotovoltaica.



Gráfica 14: Comparativa del coste de combustible en motores auxiliares.

#### 3.7.1 AMORTIZACIÓN DE LA INSTALACIÓN.

Este apartado no pretende ser el presupuesto de ejecución material de la instalación, sino una orientación económica que permita hacer un estudio de viabilidad inicial en la fase de proyecto de la instalación. Los precios que

aparecen en la tabla 11 han sido obtenidos de diversos instaladores y páginas webs especializados en la materia. (AutoSolar, 2020), (SUMIDEEC, 2020)

En el estudio económico se ha excluido los gastos de mantenimiento, esto es debido a que el mantenimiento es muy básico y quedaría a cargo del personal de abordó.

Referencia	Descripción	Cantidad	Precio Ud. €	Total €
Sirio K100	Inversor centralizado de 100 kVA	1	19.621,0	19.621
JKM320PP	Módulo policristalino de 320 W	490	275	134.750
KH915	Estructura Cubierta Metálica 3 paneles	164	64,6	10.586
	Cable Unipolar 10 mm <sup>2</sup> SOLAR PV ZZ-F R	200	1,9	384
	Cable Unipolar 10 mm <sup>2</sup> SOLAR PV ZZ-F N	200	1,9	384
	Terminal de Ojo Cable 35mm - Ojo 10mm	980	2,5	2.420,6
	Cable flexible 1x120 mm <sup>2</sup> RZ1-K 0,6/1 KV	500	13,3	6.665
XMN02410963	Autotrafo. trifásico 400/690V 100 kVA	1	1.912,5	1.912,5
<b>SUBTOTAL gastos de instalación</b>				<b>176.723,33€</b>
Gastos de resto de componentes		1	12.000	12.000
Gastos de mano de obra		1	17.000	17.000
<b>TOTAL de gastos de instalación y componente</b>				<b>205.723,3€</b>

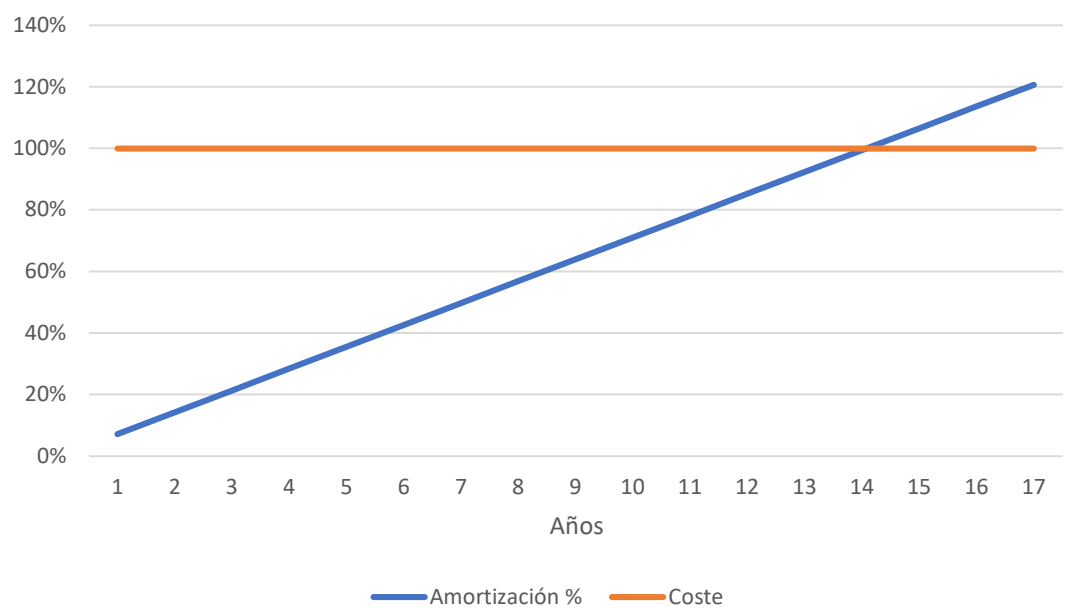
Tabla 11: Presupuesto.

Se observa que en el grueso del presupuesto un 65,5%, está destinado a los módulos solares, cierto es que, si se habla en valores unitarios, en este tipo de instalaciones lo más caro representa el convertidor, en el caso de este trabajo supone un 10% del presupuesto en un solo componente, una cifra que no parece excesiva teniendo en cuenta que depende de él la calidad de la corriente que se vierta a la red.

En términos totales, la implantación de la instalación tendría un coste de 205.723,3 €, conociendo el ahorro de combustible que produce (gráfica 14) esto genera al año una amortización de un 8,3%. Dicho esto, se llega a la conclusión de que la instalación estará totalmente amortizada en 15 años, o dicho de otra manera, empezará a generar beneficios en el décimo sexto año, esto se puede observar en la gráfica 15.



Si esta instalación se estudiara en la fase de diseño del barco sería una opción a tener en cuenta como una posible solución a la hora de la reducción de emisiones, pero el problema reside en que el buque fue puesto en servicio en el 2005 y probablemente el buque llegase al final de su vida útil y la instalación no llegue a amortizarse.



Gráfica 15: Gráfica de amortización y gastos.



## **4. CONCLUSIONES**

La cantidad de superficie donde instalar los paneles solares y la correcta elección de los mismos van a ser decisivos a la hora de sacar el mayor rendimiento a la instalación.

La irradiación en la zona de navegación del buque va a determinar la cantidad de energía eléctrica producida por la instalación y por tanto marcará la viabilidad del sistema.

Debido a que es una instalación móvil los datos de ahorro de combustibles se consideran admisibles.

El ahorro de la energía eléctrica necesaria durante la navegación se considera aceptable debido al elevado consumo de los motores auxiliares.

La instalación de paneles solares en el buque tiene una disminución de la cantidad de emisiones contaminantes, pero en términos absolutos esta disminución no es muy elevada.

Una única generación de energía alternativa respetuosa con el medio ambiente es insuficiente para rebajar el índice EEDI, ya que este tipo de buques tiene una alta potencia propulsora definida por sus características de diseño.

El peso añadido de la instalación al buque no tuvo repercusión en el estudio de estabilidad, donde los valores se mantuvieron dentro de los límites de seguridad debido a sus características de diseño.

El tiempo de amortización de la instalación no es muy elevado, pero el problema que representa su implantación se debe a que el buque que fue botado en el 2005, esto hace que muy posiblemente llegue al fin de su vida útil sin haber concluido la amortización de la instalación.



## REFERENCIAS

- alusín solar. (25 de 10 de 2019). *Tipos de estructuras para paneles solares*.  
Obtenido de <https://alusinsolar.com/tipos-estructuras-paneles-solares/>
- Aros Solar Technology. (2020). *Inversores solares trifásicos*. Obtenido de  
<http://www.aros-solar.com/es/inversores/inversores-solares-trifasico-sirio-k100-hv>
- AutoSolar. (21 de 03 de 2019). *Conexión de las placas solares: tipos y puntos a tener en cuenta*. Obtenido de <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/conexion-de-las-placas-solares-tipos-y-puntos-a-tener-en-cuenta>
- AutoSolar. (2020). *Energía Solar*. Obtenido de <https://autosolar.es>
- Bester. (2017). *Energías renovables Vs combustibles fósiles*. Recuperado el Abril de 2020, de <https://bester.energy/energias-renovables-vs-combustibles-fosiles/>
- bound4blue. (2020). *Tecnología de velas rígidas*. Obtenido de <https://bound4blue.com/es/>
- Elívere. (13 de Agosto de 2019). *Mantenimiento de Instalaciones Fotovoltaicas ¿Cómo y cuánto?* Obtenido de <https://elivere.com>
- EU Science Hub. (2020). *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. Obtenido de [www. https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis](http://www.ec.europa.eu/jrc/en/pvgis).
- Fred Olsen Express, S.A. (2005). Información técnica de astillero.
- Futurism. (5 de 2017). *China Has Launched the World's First All-Electric Cargo Ship*. Obtenido de <https://futurism.com/china-launched-worlds-first-all-electric-cargo-ship>

Gajitz. (2015). *Sun-Powered Sailboat: Yacht Features Flexible Solar Sails*.  
Obtenido de <https://gajitz.com/sun-powered-sailboat-yacht-features-flexible-solar-sails/>

Germán Cordero, R. (2019). *Paneles solares y criterios de calidad*. Obtenido de <https://www.sfe-solar.com>

Greenpeace. (2020). *Cambio climático*. Obtenido de <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/cambio-climatico/>

Híbridos y eléctricos. (23 de 06 de 2019). *Así es el primer barco fluvial del mundo propulsado por hidrógeno*. Obtenido de <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/asi-es-primer-barco-fluvial-mundo-propulsado-hidrogeno/20190623144852028504.html>

IEC. (15 de 12 de 2011). *Salt mist corrosion testing of photovoltaic (PV) modules*. Obtenido de <https://webstore.iec.ch/publication/5728>

Imaz, E. (19 de 3 de 2018). *Inversores solares, ¿qué son? y ¿qué tipos existen?* Obtenido de <https://sotysolar.es/placas-solares/inversor-solar-que-son-que-tipos-existen>

Jinko Solar. (2013). Obtenido de [https://www.jinkosolar.com/product\\_56.html?lan=sp](https://www.jinkosolar.com/product_56.html?lan=sp)

La información. (25 de Agosto de 2016). *El calentamiento global empezó con la Revolución Industrial, hace 180 años*. Obtenido de [https://www.lainformacion.com/meteorologia/cambios-climaticos/seres-humanos-desencadenaron-calentamiento-global\\_0\\_947605533.html](https://www.lainformacion.com/meteorologia/cambios-climaticos/seres-humanos-desencadenaron-calentamiento-global_0_947605533.html)

Lorenzo, J. A. (s.f.). *Cómo dimensionar y calcular paneles solares fotovoltaicos necesarios*. Obtenido de <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/calcular-paneles-solares-necesarios/>

Lorenzo, J. C. (5 de 5 de 2015). *De la mar y los barcos*. Obtenido de <https://delamarylosbarcos.wordpress.com>

- Máquinas de Barco. (25 de 11 de 2017). *Catamaranes con Proa Wave Piercing (WP)*. Obtenido de <http://maquinasdebarcos.blogspot.com>.
- Mar & Gerencia. (22 de 07 de 2010). *Las Sociedades de Clasificación de Buques*. Obtenido de <https://marygerencia.com/2010/07/22/las-sociedades-de-clasificacion-de-buques/>
- Marine Education. (02 de 07 de 2016). *A short note on ship´s energy efficiency: EEDI, SEEMP & EEOI*. Obtenido de <http://marineexam.blogspot.com/2016/08/eedi-seemp-eeoi.html>
- Marine Environment Protecctión Committee. (2018). *Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design for new ships*.
- Marine vessel traffic. (2019). *Ships List with Details and Live Maps*. Obtenido de <https://www.marinevesseltraffic.com/vessels?page=1&vessel=none&flag=none&sort=none&direction=none>
- Mayor, H. G. (15 de 07 de 2011). *Estabilidad del buque I*. Obtenido de <http://estabilidadbuque.blogspot.com/2012/04/criterios-generales-de-estabilidad-omi.html>
- Mayor, H. G. (05 de 07 de 2011). *Estabilidad inicial transversal*. Obtenido de <http://estabilidadbuque.blogspot.com/2011/07/estabilidad-inicial-transversal-v.html>
- Monsolar.com. (Julio de 2018). *Compar un panel fotovoltaico*. . Recuperado el Marzo de 2020, de <https://www.monsolar.com/blog/comprar-un-panel-solar-fotovoltaico-7-consejos-practicos/>
- MTU Solutions. (2020). *MTU a Rolls-Royce solution*. Obtenido de <http://www.mtu-report.com>
- Nautical News Today. (12 de 06 de 2013). *El catamarán,"Turanor PlanetSolar", alimentado por energía solar, estudia los efectos del cambio climático en la corriente del Golfo*. Obtenido de <https://www.nauticalnewstoday.com>

- Oliveira, J. A. (28 de 04 de 2014). *Buques de rotores Flettner. El E-Ship 1*.  
Obtenido de <https://vadebarcos.net/2014/04/28/buques-rotores-flettner-e-ship-1/>
- OMI. (2011). *Resolución MEPC.203(62)*. Obtenido de <http://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/GHG/Documents/MEPC%20203%2062.pdf>
- OMI. (2018). *Resolution MEPC.308(73)*.
- OMI. (2019). *El calentamiento global empezó con la Revolución Industrial, hace 180 años*. Obtenido de <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Air%20pollution/MEPC.308%2873%29.pdf>
- OMI. (2020). *Transporte marítimo bajo en carbono y control de la contaminación atmosférica*. Obtenido de <http://www.imo.org/es>
- PROMOTUR. (2016). *Días de sol en Las Islas Canarias*. Obtenido de <http://www.elmejorclimadelmundo.com>
- Puig, J. O. (1994). *Teoría del Buque, flotabilidad y estabilidad*. Barcelona: Ediciones de la Universidad Politécnica de Cataluña, S.L.
- Red Eléctrica de España. (2020). *Demanda y producción en tiempo real*. Obtenido de <https://www.ree.es/es>
- RHENUS Logistics. (2019). *IMO 2020*. Obtenido de <https://www.rhenus.com/es/de/landingpages/airocean/ocean-freight-imo-2020/>.
- Rico, J. (04 de 11 de 2019). *La mayor naviera mundial apuesta por el etanol, el biometano y el amoníaco como combustibles*. Obtenido de <https://www.energias-renovables.com/biocarburantes/20191104-1>
- SACLIMA. (2 de 08 de 2016). *Barcos impulsados por energía solar*. Obtenido de <http://www.saclimafotovoltaica.com/barcos-solares-2/>



- Sánchez, N. (2008). *El proyecto MV Beluga SkySails*. Obtenido de <http://maquinasdebarcos.blogspot.com/2008/09/el-proyecto-mv-beluga-skysails.html>
- Smit, S. W. (2019). *Cuando los buques y barcos se pasan a las renovables*. Obtenido de <https://ovacen.com/buques-barcos-renovables/>
- Soutullo, R. G. (2018). *Normativa, Tecnologías y Modificaciones para Reducir las Emisiones de SOx y NOx a la Atmósfera*. Obtenido de <https://ingenieromarino.com/normativa-tecnologias-y-modificaciones-para-reducir-las-emisiones-de-sox-y-nox-a-la-atmosfera/>
- SUMIDEEC. (2020). *Cables eléctricos*. Recuperado el Marzo de 2020, de <https://www.sumidelec.com>
- Terol, R. (29 de 10 de 2019). *El Presente de los barcos solares*. Obtenido de <https://www.solobarcos.es/el-presente-de-los-barcos-solares/>
- TIBA España. (15 de 03 de 2019). *Efectos de la norma IMO 2020 en el transporte marítimo*. Obtenido de <https://www.tibagroup.com/es/imo-2020>
- TOYOTA. (2020). *El primer buque de hidrógeno del mundo patrocinado por Toyota*. Obtenido de <https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/2018/primer-buque-hidrogeno-mundo-patrocinado-toyota>
- ULSTEIN. (18 de 11 de 2019). *Zero-emission operations in offshore construction market*. Obtenido de <https://ulstein.com/news/2019/zero-emission-operations-in-offshore-construction-market>
- Wikipedia. (22 de julio de 2019). *Rotor Flettner*. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Rotor\\_Flettner](https://es.wikipedia.org/wiki/Rotor_Flettner)